

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program B 2341 - Strojírenství

Materiály a technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

### **Vliv teploty přehřevu na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG**

The temperature effect of preheat on the geometry of the weld bath when  
using the MAG method

Petr Meixner  
KSP - SM - B45

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. - TU v Liberci

Počet stran: 72

Počet tabulek: 10

Počet obrázků: 34

Počet grafů: 7

Počet příloh: 6

Datum: 4. 1. 2013



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

**Petr MEIXNER**

Studijní program

**B2341 Strojírenství**

Studijní obor

**3911R018 Materiály a technologie**

Zaměření

**Strojírenská metalurgie**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

### **Vliv teploty předehřevu na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se teoreticky s metodou svařování MAG (fyzikální podstata procesu, svařovací parametry a jejich vliv na tvar svarové lázně).
2. Prostudujte vliv svařovacích parametrů na proudění v tavné lázni a vytváření geometrie svaru a zaměřte se především na vliv velikosti předehřevu.
3. Seznamte se s ovládáním systému WeldMonitor pro monitorování parametrů procesu.
4. Navrhněte experimentální program pro porovnání geometrie svarové lázně provedených při svařování s různými hodnotami teploty předehřevu.
5. Realizujte experimentální program s využitím monitorování procesu. Vyhodnoťte experimentální program, výsledky zpracujte.



# ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: Petr Meixner

Téma práce: Vliv teploty předehřevu na geometrii svarové lázně při svařování  
metodou MAG

The temperature effect of preheat on the geometry of the weld bath when  
using the MAG method

Číslo BP: KSP - SM - B45

Vedoucí BP: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. - TU v Liberci

## **Abstrakt:**

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv teploty předehřevu na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG. Práce se skládá z teoretické a experimentální části. V teoretické části je popsán princip obloukového svařování se zaměřením na metodu MAG. Dále jsou zde popsány jednotlivé vlivy procesních i technologických parametrů na geometrii svarové lázně. Experimentální část je pak zaměřena na analýzu změny geometrie svarové lázně na základě rozdílných teplot předehřevu základního materiálu. Je zde popsán postup experimentu, včetně postupu při monitorizaci procesních veličin.

Práce navazuje na výzkum v oblasti vlivu procesních a technologických parametrů na geometrii svarové lázně a výsledky budou využity pro potřeby numerických simulací svařování.

**Abstract:**

The main aim of this bachelor thesis was to investigate the temperature effect of preheat on the geometry of a weld bath when using the MAG method. The thesis consists of a theoretical and an experimental part. In the theoretical part, there is described the principal of arc welding, especially the MAG method. Furthermore, there are described particular effects of the process and technological parameters on the geometry of the weld bath. The experimental part focuses on the analysis of change of the weld bath geometry on the basis of different temperatures of preheat of fundamental material. There is described the procedure of the experiment including the procedure process quantity monitoring.

This work continues in the research in a field of influence of the process and a technological parameter on the weld bath geometry and its results will be used for a need of a weld numerical simulations.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 4. 1. 2013

.....  
Petr Meixner

Jesenný 244

512 12 Jesenný

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Jaromírovi Moravcovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a především za jeho trpělivost při naší spolupráci.

Dále bych chtěl poděkovat panu Zdeňku Petrovi, IWT za zapůjčení odborných publikací, jež mi byly nápomocny při tvoření této práce.

V neposlední řadě musím poděkovat také své rodině za podporu během celého mého studia.

Petr Meixner

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>1. 1 Historie svařování.....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>2. 1. Elektrický oblouk.....</b>	<b>- 12 -</b>
2. 1. 1. Části oblouku.....	- 13 -
2. 1. 2. Voltampérova charakteristika oblouku.....	- 14 -
2. 1. 3. Tepelné účinky oblouku.....	- 14 -
2. 1. 4. Mechanické účinky oblouku.....	- 15 -
<b>2. 2. Svařování metodou MAG.....</b>	<b>- 15 -</b>
2. 2. 1. Charakteristika a rozsah použití metody MAG.....	- 16 -
2. 2. 2. Zdroje pro svařování metodou MAG.....	- 17 -
2. 2. 3. Podavače drátu.....	- 18 -
2. 2. 4. Přenos kovu v oblouku.....	- 19 -
<b>2. 3. Vliv vstupních parametrů na geometrii na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG.....</b>	<b>- 24 -</b>
2. 3. 1. Procesní vstupní parametry.....	- 24 -
2. 3. 1. 1. Svařovací proud.....	- 24 -
2. 3. 1. 2. Proudová hustota.....	- 24 -
2. 3. 1. 3. Svařovací napětí.....	- 25 -
2. 3. 1. 4. Druh a polarita proudu.....	- 26 -
2. 3. 1. 5. Výlet drátu a vzdálenost kontaktní špičky.....	- 26 -
2. 3. 1. 6. Rychlost svařování.....	- 27 -
2. 3. 1. 7. Vliv ostatních parametrů.....	- 27 -
2. 3. 2. Technologické vstupní parametry.....	- 29 -
2. 3. 2. 1. Teplota přehřevu.....	- 29 -
2. 3. 2. 2. Teplota interpass.....	- 30 -
2. 3. 3. Fyzikálně chemické vstupní parametry.....	- 31 -
<b>2. 4. Ochranné plyny pro svařování metodou MAG.....</b>	<b>- 31 -</b>
2. 4. 1. Rozdělení plynů.....	- 32 -
2. 4. 2. Vliv plynů na stabilitu elektrického oblouku.....	- 32 -
2. 4. 3. Vliv množství přiváděného plynu.....	- 33 -
2. 4. 4. Vliv plynů na přenos tepla a profil svarové lázně.....	- 33 -
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>- 34 -</b>
<b>3. 1. Cíle experimentální části.....</b>	<b>- 34 -</b>

3. 1. 1.	Rozdělení experimentální části.....	- 34 -
<b>3. 2.</b>	<b>Zařízení pro realizaci experimentální části.....</b>	<b>- 35 -</b>
3. 2. 1.	Katedrové pracoviště - příprava vzorků.....	- 35 -
3. 2. 2.	Laboratoř svařování.....	- 36 -
3. 2. 3.	Příprava vzorků na metalografické zpracování.....	- 42 -
3. 2. 4.	Metalografická laboratoř.....	- 43 -
<b>3. 3.</b>	<b>Vyhodnocování experimentálních prací.....</b>	<b>- 45 -</b>
3. 3. 1.	Vyhodnocení svařovaných vzorků.....	- 45 -
3. 3. 2.	Ukázka vyhodnocení vzorků S5c239.....	- 50 -
<b>3. 4.</b>	<b>Vyhodnocení experimentu.....</b>	<b>- 52 -</b>
<b>4.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>- 60 -</b>
<b>5.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>- 62 -</b>
<b>6.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>- 64 -</b>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

TIG	- svařování netavící se elektrodou	
MIG/MAG	- svařování tavící se elektrodou	
MMA	- svařování obalenou elektrodou	
U	- svařovací napětí	[V]
I	- svařovací proud	[A]
ČSN	- Česká technická norma	
L <sub>D</sub>	- velikost výletu drátu	[mm]
L <sub>P</sub>	- vzdálenost kontaktní špičky od zákl. materiálu	[mm]
CTS	- zkouška praskavosti	
T <sub>P</sub>	- teplota přehřevu	[°C]
s	- tloušťka materiálu	[mm]
C <sub>C</sub>	- uhlíkový ekvivalent	[%hm.]
v <sub>s</sub>	- rychlost svařování	[m·min <sup>-1</sup> ]
R <sub>m</sub>	- mez pevnosti	[MPa]
R <sub>e</sub>	- mez kluzu	[MPa]
PA - PF	- polohy svařování	
Q	- měrné vnesené teplo	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
U <sub>ef</sub>	- efektivní hodnota napětí	[V]
I <sub>ef</sub>	- efektivní hodnota proudu	[A]
η	- účinnost přenosu tepla	[-]
L <sub>C</sub>	- celková délka svarové lázně	[mm]
a	- velikost koutového svaru	[mm]
w	- šířka koutového svaru	[mm]
v <sub>max</sub>	- maximální hloubka protavení	[mm]
a, b, b <sub>max</sub> , c, e, p,		
w, x, x <sub>max</sub> , z, z <sub>max</sub>	- analyzované rozměry makrostruktury svarové	
v, v <sub>max</sub> , α, β <sub>1</sub> , β <sub>2</sub>	lázně	[mm,°]
P <sub>C</sub>	- celková plocha svaru	[mm <sup>2</sup> ]
P <sub>Δ</sub>	- nosná plocha svaru	[mm <sup>2</sup> ]
P <sub>n</sub>	- plocha návaru	[mm <sup>2</sup> ]

# 1. ÚVOD

Hlavním cílem této bakalářské práce je analýza vlivu teploty přehřevu na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG. V teoretické části je rozebrána problematika elektrického oblouku a teorie MAG. Dále je zde rozebrána problematika vlivu vstupních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG. V experimentální části je řešen vliv teploty přehřevu s následnou geometrickou analýzou svarové lázně včetně jejího grafického vyhodnocení.

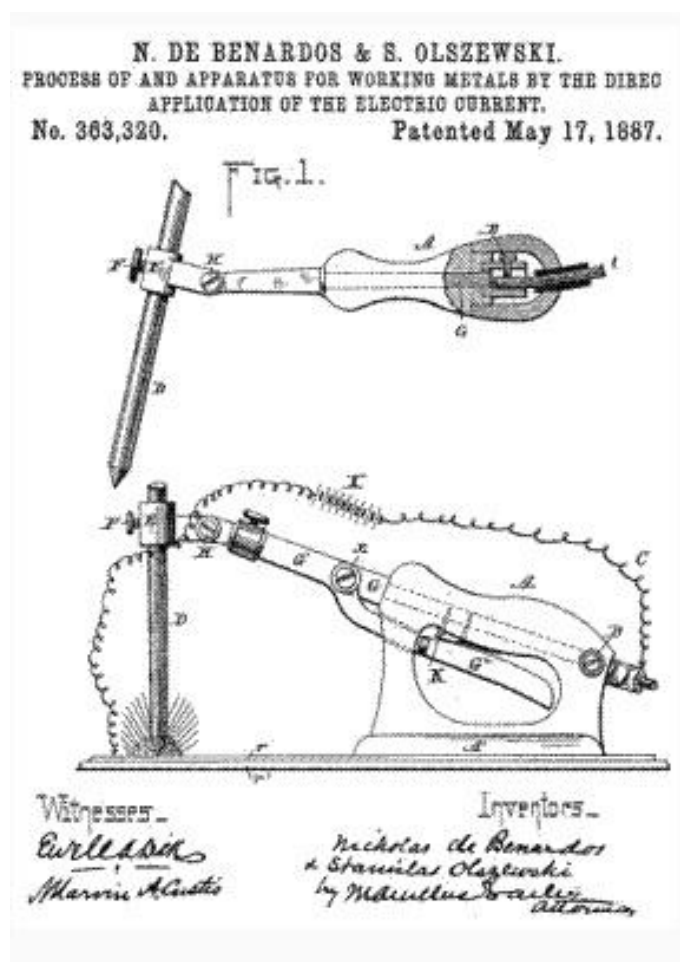
## 1. 1. Historie svařování

Z historického hlediska nesahají dějiny svařování tak daleko, jako je tomu například u slévání. Archeologické nálezy nám přinesly důkazy o znalostech kovářského svařování v období již před 4000 - 5000 lety. Avšak počátky svařování využívaného v průmyslu - svařování elektrickým obloukem, plamenem a svařování odporové - nesahají v historii nijak daleko, pouze do 80. let 19. století. Výrazným hnacím motorem pro vznik v těchto oborů byla průmyslová revoluce, která se šířila napříč Evropou ze západu na východ. Další příčinou pozdějšího vzniku tohoto odvětví byl také následek toho, že svařování je závislé na znalostech velkého množství vědních oborů a to hlavně matematiky, fyziky, chemie, fyzikální chemie, fyzikální metalurgie, nauky o materiálech a dalších, z čehož plyne, že svařování má mezioborový charakter a je poměrně náročným odvětvím ve strojírenství. [1]

Konkrétně obloukové svařování se začalo rozvíjet až po objevení možnosti tavení kovů elektrickým obloukem. Počátek je datován rokem 1801, kdy ho začal využívat Angličan sir Humphry Davy. V Rusku se zmiňoval o této metodě roku 1803 ruský fyzik V. V. Petrov. V praxi se začalo ale obloukové svařování využívat trochu později. Roku 1881 použil uhlíkovou elektrodu k obloukovému svařování olověných desek Auguste de Meritens. První svarový spoj vzniklý svařováním mezi uhlíkovou elektrodou a základním kovem byl praktikován N. N. Benardosem, jehož vynález byl předveden na výstavě v Paříži roku 1889, kde bylo prezentováno nejméně 15 způsobů využití jeho vynálezu. Je proto považován za nositele prvního patentu obloukového svařování. Dalším důležitým vynálezcem byl ruský inženýr A. G. Slavjanov, který svařoval holými kovovými elektrodami, na něhož navázal roku 1907 švédský inženýr O. Kjellberg se svařováním elektrodami obalenými. V Československu se začalo obloukové svařování rozvíjet po roce 1927. V této době byl ve Škodových závodech (zásluhou Prof. Františka Faltuse) postaven první celosvarovaný most, v té době největší na světě. Byl svařován holými kovovými elektrodami. V roce 1933 byl v Plzni postaven další most svařovaný elektrodami obalenými. Roku 1949 byl založen

významným odborníkem ve svařování Prof. Jozefem Čabelkou Výzkumný ústav zvaračský (VÚZ). [1,3]

Svařování jako takové je procesem, který slouží k vytvoření trvalého nerozebíratelného spoje dvou nebo více součástí. Obecným požadavkem kladeným na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, za nichž je možný vznik nových meziatomárních vazeb. Za běžných podmínek (běžná teplota, tlak) je velmi obtížné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb, kdy je termodynamický stav materiálů stabilní respektive metastabilní, a proto je třeba tento termodynamický stav změnit a to buď tlakem, teplem nebo oběma faktory současně. Je obecně známo, že čím větším tlakem je působeno, tím méně tepla je potřebné vnést a obráceně. Tavným svařováním je označováno svařování za převážného působení tepla a tlakové za převážného působení tlaku. Na obrázku 1.1. je ukázán Benardosův a Olsewského patent obloukového svařování. [6]

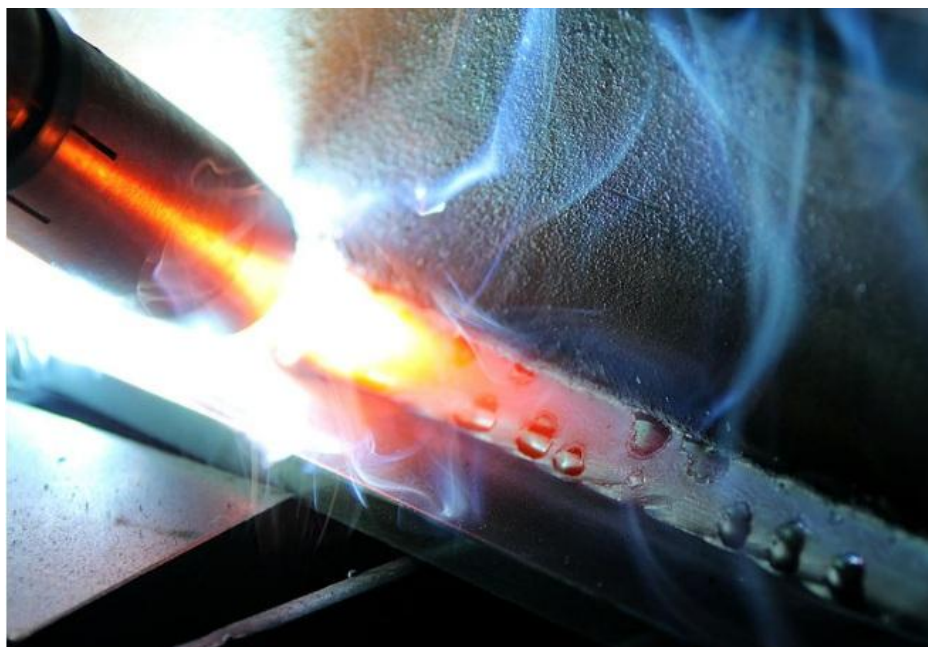


obr. 1. 1: Benardosův a Olsewského patent obloukového svařování [16]

## 2. Teoretická část

### 2. 1. Elektrický oblouk

Podstata elektrického oblouku je v nízkonapětovém elektrickém vysokotlakém výboji, který hoří v prostředí ionizovaného plynu, jinak řečeno v ochranné atmosféře inertní, aktivní či směsné. Oblouk hoří stabilně za předpokladu, že je dosaženo dostatečného napětí pro ionizaci daného prostředí a proudu, jenž udržuje plazma oblouku v ionizovaném stavu. Elektrický oblouk je při svařování využíván k přeměně elektrické energie na energii tepelnou. Na obr.2.1. je hořící elektrický oblouk.



*obr. 2. 1: Elektrický oblouk [17]*

- **Znaky charakterizující oblouk:**
  - 1) malý anodový úbytek napětí
  - 2) malý rozdíl potenciálu na elektrodách
  - 3) proud v řádu desítek až tisíců ampér
  - 4) velká proudová hustota katodové skvrny
  - 5) intenzivní vyzařování světelného záření z elektrod i sloupce oblouku (viz. obr.2. 1.)
  - 6) intenzivní vyzařování UV záření

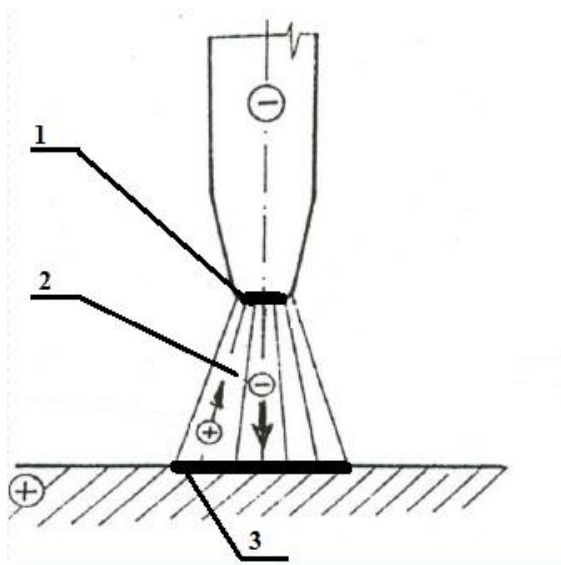
Co se týká fyzikálních a metalurgických dějů, ty probíhají v oblouku velmi rychle a za vysokých teplot, a tím ovlivňuje hoření oblouku. Na hoření oblouku má vliv složení plazmatu, materiál elektrod, částečně také okolní atmosféra, geometrické uspořádání a tvar elektrod, tepelná vodivost plazmatu, elektrody a základního materiálu. [3]

### 2. 1. 1. Části oblouku

Každý oblouk v elektrickém obvodu představuje určitý odpor závisící na parametrech výboje. Elektrický oblouk se z hlediska svařování obvykle nachází mezi elektrodou a základním materiálem. Je rozdělován na tři základní oblasti: katodovou skvrnu, sloupec oblouku a anodovou skvrnu. [3,8]

#### 1) Katodová skvrna

Jedná se o ostře ohraničenou oblast oblouku, která termickou emisí emituje prvotní elektrony, jež jsou důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. V oblasti katodového úbytku napětí získávají elektrony tak velkou kinetickou energii, že jsou schopny při srážkách ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony. Teplota katodové skvrny je kolem 2600 °C. [3,8]



obr. 2. 2: Části oblouku[12]

#### 2) Sloupec oblouku

Jedná se o zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy vyskytující se mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot. Maximální teplota sloupce oblouku je ovlivněna mnoha faktory a to především počtem srážek částic v oblouku, jenž je dán intenzitou proudu a hodnotou napětí. Dále závisí na prostředí oblouku určující stupeň disociace a ionizace v závislosti na teplotě. Co se týká elektrické vodivosti plynů, ta závisí na počtu kladných a záporných částic ve sloupci oblouku. Při běžných podmínkách je plyn nevodivý, protože elektrické náboje elektronů a jader jsou v rovnováze. Ke změně dochází prvotním uvolněním elektronů z katody a zvýšenou teplotou či ohřevem plynu elektrickou vysokonapětovou jiskrou, kdy se rovnováha nábojů poruší oddělením jednoho nebo více elektronů z orbitu atomu. Tento jev je nazýván jako vícestupňová ionizace. Maximální

teplota oblouku v oblasti sloupce je ve středu a k okraji klesá. Nejvyšší teplota je těsně pod katodovou skvrnou a to až 16000 °C. Při svařování obalenou elektrodou se teplota oblouku pohybuje v rozmezí 4200 - 6400 °C, u svařování pod tavidlem je to v rozmezí 6200 - 7800 °C, při svařování metodou TIG je to 6500 - 9000 °C. Nejvyšší teploty je u obloukového svařování ale dosaženo u svařování metodou MIG/MAG, kde je produkována vysoká proudová hustota, která vytváří velmi vhodné podmínky pro ionizaci. Teplota oblouku se zde pohybuje v rozmezí 8000 - 15000 °C. [3,8]

### **3) Anodová skvrna**

Anodová skvrna neutralizuje a odvádí dopadající záporné částice. Při tomto jevu se kinetická energie částic mění na tepelnou a z části i na elektromagnetické záření. Anodová skvrna má vyšší teplotu než katodová a to proto, že se zde intenzivněji uvolňuje teplo při neutralizaci rychle letících elektronů a přeměně kinetické energie elektronů na tepelnou. Teplo se pohybuje kolem 2700 - 3600 °C. [3,8]

## **2. 1. 2. Voltampérova charakteristika oblouku**

Statická voltampérova charakteristika oblouku vyjadřuje závislost proudu na napětí oblouku a to při konstantní délce oblouku. Na polohu charakteristiky oblouku a na jeho tvar má značný vliv chemické složení elektrody, geometrie hrotu elektrody, průměr elektrody a složení plazmatu oblouku. [3]

Z důvodu těchto atributů se někdy používá standardní statická charakteristika oblouku:  $U = 20 + 0,04 \cdot I$ . [3]

Sloupec oblouku se chová jako spotřebič s konstantním elektrickým odporem. V katodové a anodové oblasti má ale charakter spotřebiče s klesajícím odporem. Jednotlivé technologie svařování se projevují různými statickými charakteristikami, které jsou závislé na parametrech, prostředí v němž hoří oblouk, dále na tom, zda je svařováno ručně nebo poloautomatem, respektive automatem. [3]

## **2. 1. 3. Tepelné účinky oblouku**

Obloukové svařování má velikou přednost v aplikaci, protože oblouk je intenzivním zdrojem tepla koncentrovaném na poměrně malé ploše svařovaného materiálu a ve srovnání s například plamenovým svařováním, je samotná účinnost přenosu tepla do svaru dobrá. Tepelné a mechanické účinky oblouku lze měnit úpravou parametrů, které řídí charakter a rozměry svarové lázně, tepelné ovlivnění základního materiálu, zbytková napětí a deformace svaru. Teplo vzniklé v oblouku předává jednu třetinu katodě a dvě třetiny anodě. [3]

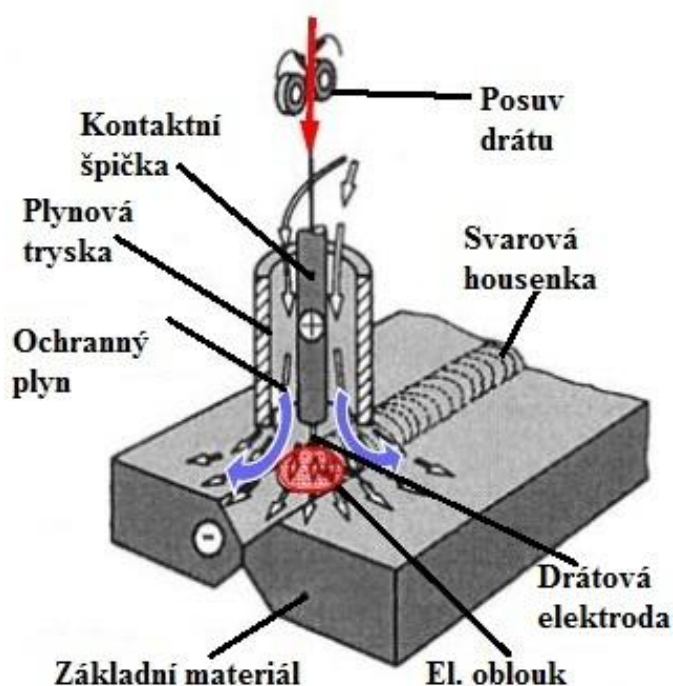
## **2. 1. 4. Mechanické účinky oblouku**

Obecným požadavkem kladeným na jednotlivé metody svařování, je získání hlubokého závaru. Síla působící na tavnou lázeň je vyvozena celou řadou faktorů, které jsou různě důležité a závisí na parametrech svařování. Faktor jenž má největší vliv u všech svařování, je tlak proudu plazmatu, jenž je vyvolán vysokou rychlostí proudění plazmatu, která dosahuje až  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a dále velice závisí na prostředí ochranného plynu, konkrétně na jeho měrné hmotnosti. Nejvyššího tlaku oblouku je u svařování dosaženo v ochranné atmosféře  $\text{CO}_2$  a nejnižšího u He. [3]

## **2. 2. Svařování metodou MAG**

Metoda MAG patří mezi metody svařování v ochranných atmosférách plynů, kde vzniká oblouk mezi nepřetržitým svařovacím drátem a svařencem (viz. obr. 2. 3.). Oblouk a svarová lázeň je chráněna proudem aktivního plynu. Tato metoda je v dnešní době využitelná pro většinu materiálů. Přídavné materiály jsou k dispozici pro široký sortiment kovů. Důvodem rozšíření této metody je její produktivita, která je znatelně vyšší než u metody svařování obalenou elektrodou (MMA), kde se produktivita ztrácí pokaždé, když svářeč přeruší svařování za účelem výměny elektrody. Další výhody této metody spočívají v tom, že svarový kov můžeme ukládat ve větším množství a ve všech svařovacích polohách. Používá se pro svařování velmi lehkých až středně těžkých ocelových konstrukcí a obzvláště tam, kde se vyžaduje vysoký podíl ruční práce svářeče. Tato metoda je v současnosti značně robotizovaná a je pro ni proto vyráběn široký sortiment zařízení. Svařovací zařízení určené pro metodu MAG mohou být monofunkční, kde je dále zahrnuta pouze metoda MIG a nebo multifunkční, kdy zařízení umožňuje použít i metody svařování TIG a MMA. [6,7]

Tato metoda má samozřejmě i svá negativa, mezi která patří riziko vzniku studených spojů, dále poměrně velký rozstřik svarového kovu, možnost vypálení legur chromu a molybdenu ze základního materiálu. Metoda MAG se také vyznačuje poměrně velkou intenzitou UV záření, které je zdraví škodlivé.



obr. 2. 3: Schéma metody MAG [5]

### 2. 2. 1. Charakteristika a rozsah použití metody MAG

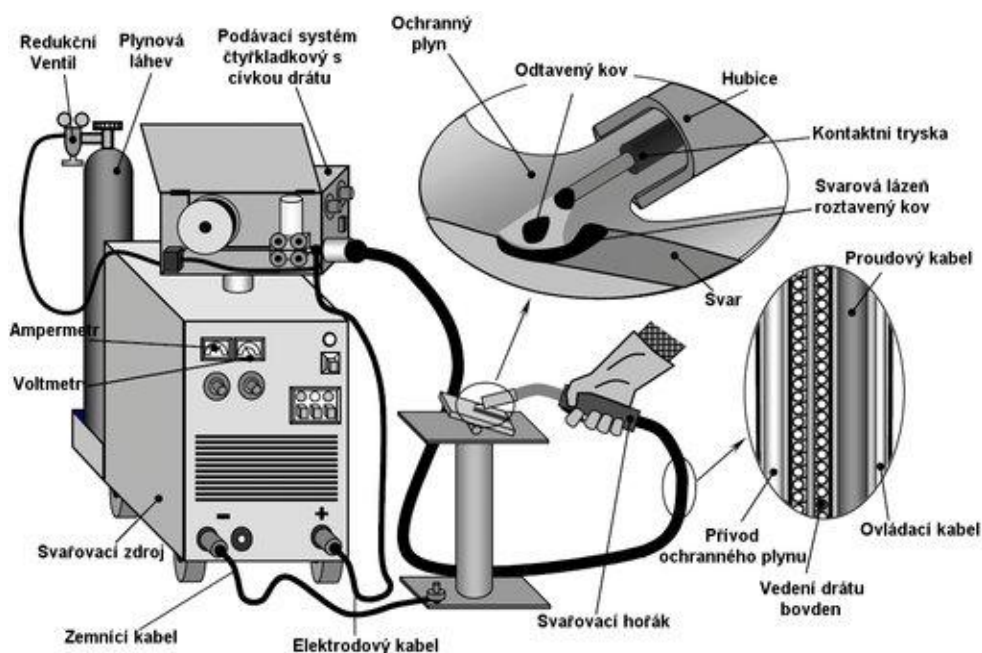
Metoda 135 MAG je dle normy ČSN EN ISO 6947 použitelná pro všechny polohy svařování. Je vhodná pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysocelegovaných ocelí s tloušťkou 0,8-40 mm. Tato metoda je proto ideální pro použití ve výrobě a při opravách. Svařuje se stejnosměrným proudem, kde je elektroda připojena na plus pól a zdroje mají plochou V-A charakteristiku. MAG svařování dnes dosahuje v oblastech vysokých výkonů nových dimenzí. Pro tuto metodu svařování jsou charakteristické vysoké proudové hustoty v rozmezí  $100-600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$  a to při hodnotě proudu 30-800 A, proto je dosahováno vysokých svařovacích rychlostí a výkonů odtavení, velké produktivity a hlavně velké svařovací rychlosti a hlubokého závaru. Obvykle se do 380 A svařuje manuálně a nad 400 A v plně mechanizovaných procesech, kde se v praxi používají dráty o průměru 1,2 mm. Tím je možno se dostat k tavným výkonům  $10 \text{ až } 12 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ , v oblasti rotujících elektrických oblouků je možné odtavení i více než  $20 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ . Přenosové jevy v oblouku jsou řízeny elektromagnetickými silami, kapky kovu jsou přenášeny obloukem rychlostí kolem  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  za teploty mezi  $1700-2500^\circ\text{C}$ . Teplota svarové lázně je  $1600-2100^\circ\text{C}$ . Ochranná atmosféra se volí dle druhu základního materiálu a ovlivňuje též přenos materiálu obloukem, rozstřík svarového kovu a teplotní poměry v oblouku. [1,9,10]



## 2. 2. 2. Zdroje pro svařování metodou MAG

Při svařování metodou MAG se používají zdroje se stejnosměrným výstupem proudu, kde kladný pól zdroje je připojen na drátovou elektrodu neboli anodu. Jako zdroje se používají usměrňovače, dnes převážně invertory různých výkonových vlastností. Díky schopnosti zdrojů udržovat konstantní napětí samoregulační schopností udržování konstantní délky oblouku, mají zdroje MAG plochou statickou charakteristiku. Tato regulace vychází z výrazné změny proudu při relativně malé změně délky oblouku a tím také napětí na oblouku. Tento princip regulace délky oblouku je však možný jen při konstantní rychlosti podávání drátu. Při změně délky oblouku se změní napětí, tudíž se podle pohybu pracovního bodu na statické charakteristice mění proud. V praxi se při dlouhém oblouku sníží proud a rychlost odtavování elektrody. Při konstantní rychlosti podávání drátu se začne samotný drát přibližovat ke svarové lázni a oblouk se tímto zkrátí. Totéž platí i naopak, pokud je oblouk krátký, s poklesem napětí, zvýší se zde intenzita proudu a odtavování drátu je tedy rychlejší. Délka oblouku se tímto způsobem zvětší a u reálného procesu svařování osciluje kolem nastavené hodnoty. [3]

Schéma zdroje a jeho zapojení je na obr. 2. 4.



obr. 2. 4: Schéma zdroje a jeho zapojení [6]

### 2. 2. 3. Podavače drátu

Při svařování metodou MAG je jako přídavný materiál používán nepřetržitě podávaný drát do hořáku pomocí podavače, který jej odvíjí z cívky uložené v unašeči s brzdou. Podavač drátu zaručuje rovnoměrné podávání drátu bez jeho deformace a poškození povrchu, dále zaručuje stabilitu celého procesu svařování včetně přenosu kovu do svarové lázně. Tato funkce je zajištěna podávacím mechanismem s pohonem drátu jednokladkovým, dvoukladkovým, čtyřkladkovým nebo také s mimoběžnými osami s tzv. rotačním posuvem. Podávací kladky mohou mít různé typy drážek podle materiálu a provedení podávaného drátu. Rychlost podávání je u běžných zařízení nastavitelná v rozmezí 1 - 25 m·min<sup>-1</sup>, u strojů s vysokým odtavovacím výkonem se rychlost pohybuje až kolem 30 m·min<sup>-1</sup>. [3,11] Na obr.2.5. je soustava podavače s cívkou.

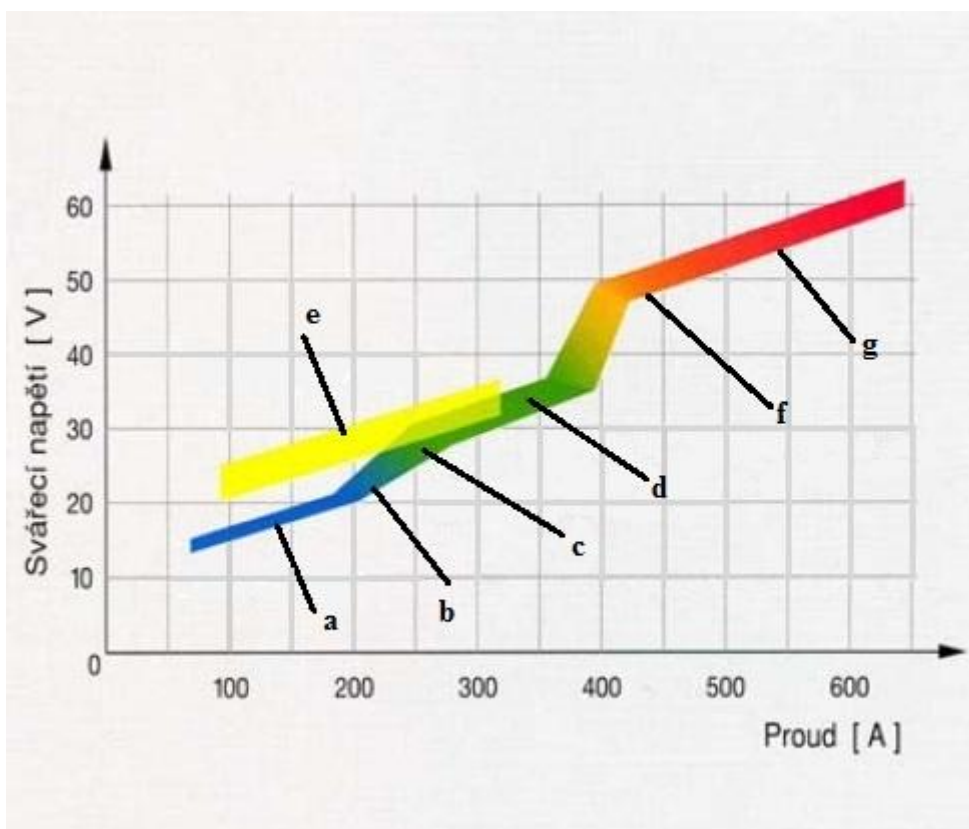


obr. 2. 5. Podavač drátu s cívkou na unašeči [19]

## 2. 2. 4. Přenos kovu v oblouku

Mezi základní charakteristiky svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou patří přenos kovu v oblouku, který závisí především na svařovacích parametrech neboli proudu a napětí, a dále závisí charakter přenosu na složení ochranného plynu, druhu přídavného materiálu a v neposlední řadě technice svařování. [3] Na obr.2.6. jsou popsány jednotlivé typy přenosu kovu v oblouku.

- **Rozdělení jednotlivých typů:**
  - a) krátký oblouk se zkratovým přenosem
  - b) krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
  - c) přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty
  - d) dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem
  - e) impulzní bezzkratový oblouk
  - f) moderovaný bezzkratový přenos
  - g) dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu [3]



Obr. 2. 6: Přenos kovu v oblouku[5]

### a) Krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu

Tento přenos se uplatňuje v rozsahu svařovacího proudu v rozmezí 60 - 180 A a napětí 14 - 22 V. Výkon odtavení se pohybuje při tomto přenosu v rozmezí 1 - 3 kg·hod<sup>-1</sup>. Dochází zde k přerušování oblouku zkratem, při kterém se odděluje část kovu elektrody.

Experimenty bylo prokázáno, že při vysokém napětí 25 - 30 V a nízkém svařovacím proudu je frekvence kapek malá a rozstřík kovu velký. Pro svařovací drát o průměru 1,2 mm je frekvence při napětí cca 27 V kolem 5 kapek za sekundu. Při nižším napětí mezi 14 -18 V roste počet zkratů až na 200 za sekundu. Procesy, jež zde byly popsány, souvisí se zkracující se délkou oblouku, kdy se vlivem rychlejšího posuvu drát přiblíží do zkratu s tavnou lázní dříve, a tím zamezí narůstání kapky kovu na konci drátu. Povrchové napětí taveniny způsobuje to, že se kapka kovu rovnoměrně rozptýlí ve svarové lázni. [3]



Obr. 2.7: Zkratový přenos [5]

Zkratový přenos je uskutečnitelný ve všech ochranných atmosférách a podmínkou tohoto procesu jsou dynamické vlastnosti zdroje, které umožňují proudovou špičku vhodné velikosti. Při použití CO<sub>2</sub> je nutné nastavovat napětí na zdroji o 2 - 3 V vyšší než už směsí Ar+CO<sub>2</sub>, na druhou stranu u směsí Ar+O<sub>2</sub> je nutné nastavit napětí o 1 - 2 V nižší. [3]

Zkratový proces přenosu je využíván především v oblastech svařování tenkých plechů, kořenových vrstev tupých svarů nebo k překlenutí širších mezer. Tento způsob přenosu je vhodný pro svařování ve všech polohách a dále je vhodný pro svařování vysokolegovaných ocelí. [3]

### b) Krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem

Základní charakteristikou tohoto přenosu je tvorba malých kapek svarového kovu. Dále to jsou neobvyklé parametry, protože zatímco napětí odpovídá svými hodnotami 14 -25 V zkratovému přenosu, tak hodnoty svařovacího proudu se pohybují nad 200 A a rychlost podávání drátu odpovídá oblasti sprchového přenosu. Tento přenos bývá označován jako proces RAPID ARC. Dále se liší od zkratu dlouhým výletem drátu, který bývá 25 - 30 mm dlouhý a relativně velkým sklonem hořáku. Vzhledem k těmto atributům je proto nutné zvýšit průtok plynu na 20 - 30 l · min<sup>-1</sup>. [3]

Tento typ přenosu je opět uskutečnitelný ve všech polohách. Umožňuje svařovat s vysokým výkonem odtavení a vysokou rychlostí svařování tenké plechy od tloušťky 1 mm, dále je vhodný pro kořenové svary. [3]

Svařování tímto typem přenosu je uskutečnitelné ve směsi Ar + 8% CO<sub>2</sub>. Mezi přednostmi patří malý rozstřík bez ulpívání kapek na povrchu základního materiálu a dobrý profil svarové housenky. Naopak nevýhodou je cena ochranného plynu, která je ve srovnání s čistým CO<sub>2</sub> vyšší. [3]

#### **c) Přejímový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty - kapkový**

Přejímový oblouk vzniká při průměrných proudových hodnotách v rozmezí 190 - 300 A a při napětí 22 - 28 V. Jeho projev je výrazný v ochranné atmosféře CO<sub>2</sub>, jež způsobuje velké povrchové napětí a velký rozstřík, který vzniká při občasných nepravidelných zkratech (frekvence 5 - 40 kapek za s) a mimoosmým vymrštění kapky (viz.obr. 2. 14.). [3]

Lze ho použít na svařování materiálů středních tlouštěk, nevýhodou je hrubá svarová housenka a již zmíněný velký rozstřík svarového kovu, který je nežádoucí, a proto se nedoporučuje používat. [3]



*obr. 2. 8: Vyosená kapka kovu[5]*

#### **d) Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem**

Typické hodnoty svařovacího proudu jsou v této oblasti přenosu od 200 - 500 A a napětí 28 - 40 V. Při realizaci sprchového přenosu nelze použít ochranná atmosféra čistého CO<sub>2</sub>. Je to z důvodu vysokých hodnot povrchového napětí svarového kovu. Realizuje se proto ve směsích plynů Ar s CO<sub>2</sub> či O<sub>2</sub> s minimálním 80% podílem Ar, nebo čistého Ar při svařování neželezných kovů. Charakteristické pro tento přenos je, že díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavící se elektrody, což způsobuje rychlý ohřev drátu tvořící následně ostrý hrot. Další atributem je dlouhý výlet svařovacího drátu, který činí 15x násobek průměru drátu, to přispívá přehřevu drátu vlivem odporového tepla. Díky tomu jsou účinkem magnetického pole ustřiženy vytvořené drobné kapky, jež jsou zároveň osově urychleny ve vysoké frekvenci 130 - 350 Hz směrem k tavné lázni. [3]

Průběh proudu je během celé periody oddělování kapek vcelku konstantní, ale neplatí to v okamžiku přerušení můstku, kdy mírně narůstá. Oblouk během hoření nezhasíná, hoří klidně, což se projevuje syčením, které občas přerušuje prasknutí. To způsobuje, že se do základního materiálu vnáší velké množství tepla, proto je sprchový oblouk charakteristický velkou hloubkou závaru, která roste lineárně se vzrůstající hodnotou proudu a dále je charakteristický vysokým výkonem odtavení, pohybující se mezi 3 - 12 kg·hod<sup>-1</sup>, což je až 4x vyšší než u zkratového přenosu. [3]



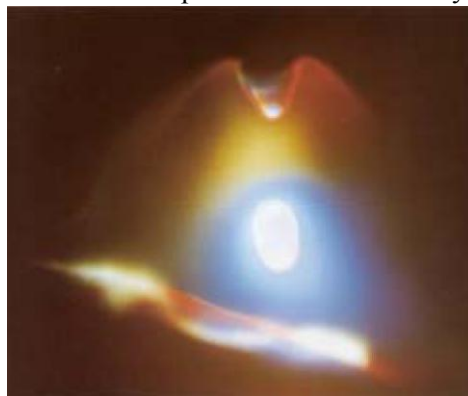
Využití sprchového přenosu je pro výplňové housenky svarů středních a velkých tlouštěk. Předností je, že povrch svarové housenky je hladký a čistý s plynulým přechodem do základního materiálu, a to vše bez rozstříku. Nevýhodou je omezené využití v polohách z důvodu velikosti tavné lázně. [3]



*obr. 2. 9: Sprchový přenos[5]*

#### **e) Impulsní bezzkratový přenos**

Jedná se o zvláštní modifikaci bezzkratového přenosu kovu. Parametry svařování totiž překrývají oblast zkratového a sprchového přenosu. Průběh přenosu je řízen elektronickou cestou, má pravidelný cyklus daný frekvencí amplitudy impulsního proudu, která se pohybuje mezi 25 - 500 Hz, výjimečně až 1 kHz. Základní proud je nízký od 20 - 50 A, jeho hlavní funkcí je udržení ionizovaného prostředí ve sloupci oblouku a tím tedy i vedení proudu. Naproti tomu impulsní proud je libovolně stavitelný, je tvarově i časově řízený (0,2 - 5 ms). V konečné fázi amplitudy impulsního proudu se odtavuje kapka přídavného materiálu (viz.obr.2. 16.). Oblouk hoří intenzivně po celou dobu impulsního proudu a je jím ohřívána svarová lázeň spolu s přídavným materiálem. [3]



*obr.2 .10: Odtavená kapka kovu[5]*

Tímto typem přenosu mohou být svařovány tenké plechy v polohách, dále je vhodný pro svařování hliníku a jeho slitin. Během svařování se vnáší do základního materiálu daleko méně tepla, protože efektivní hodnota impulsního proudu je nižší než u konstantního. Další výhodou je možnost svařování s dráty větších průměrů, které jsou levnější, výkon odtavení se pohybuje mezi 2 - 5 kg·hod<sup>-1</sup>. Svarová housenka má pravidelnou a jemnou kresbu povrchu svaru i kořene, srovnatelnou s metodou TIG. Zdroje umožňují široké aplikační možnosti. [3]

Co se týká ochranných atmosfér, tak pro svařování uhlíkových ocelí by měla být používaná směs Ar + 8 % CO<sub>2</sub> a pro legované oceli Ar + 2 % O<sub>2</sub>. U svařování hliníkových slitin se používá čistý Ar. [3]

#### **f) Moderovaný bezzkratový přenos**

Jedná se o typ přenosu, který se řadí mezi vysokovýkonné metody svařování, někdy také označované jako RAPID MELT. Je charakteristický výrazně zvýšeným napětím v rozmezí 40 - 50 V a svařovacím proudem 450 - 750 A. Odpovídá tomu také vysoká rychlosti posuvu drátu pohybující se v rozmezí 20 - 45 m·min<sup>-1</sup>, a tím je zvýšen také výkon odtavení až na 25 kg·hod<sup>-1</sup>. Samotný přenos je tvořen relativně rozměrnými kapkami kovu, jejichž velikost odpovídá průměru svařovacího drátu. Jsou odtavovány za vysoké frekvence z dlouhého výletu drátu, dále jsou urychlovány do tavné lázně, která je tvarována plazmou i dopadem kapek do hlubokého a úzkého závaru. Hlavní výhodou této metody je možnost vysokých rychlostí svařování i velkých tloušťek svařovaného materiálu [3]

Doporučená ochranná atmosféra pro tento přenos je směs argonu + 8% CO<sub>2</sub> při průtoku plynu mezi 18 - 25 l·min<sup>-1</sup>. [3]

#### **g) Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu**

Tento typ přenosu kovu je téměř stejný jako moderovaný, odlišný je jen ve zvýšeném napětí na oblouku a to až na 65 V a dále větším výletu drátu nad 20 mm. Drát je vlivem odporového tepla předeříván téměř na teplotu tavení a jeho vysoce plastický konec je vlivem intenzivního magnetického pole roztáčen a odtavující kapky vytvářejí kuželovou plochu (viz. obr. 2.17.). Díky rotujícímu oblouku je umožněn velmi dobrý závar do boků svarové plochy a je vytvářen hluboký a široký svar s miskovitým profilem. [3]



*obr. 2. 11: Rotující oblouk[5]*

## **2. 3. Vliv vstupních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG**

Geometrie svarové lázně je u tavného svařování obloukovými metodami charakteristická tím, že je ovlivněná velkým množstvím vstupních proměnných parametrů, které vlastní výslednou geometrii ovlivňují ve větší či menší míře. Tyto parametry se rozdělují do tří základních skupin a to na skupiny vstupních procesních parametrů, technologických vstupních parametrů a fyzikálně-chemických vstupních parametrů.[4]

### **2. 3. 1. Procesní vstupní parametry**

Procesní vstupní parametry jsou největší skupinou proměnných, pro něž je charakteristické to, že se nastavují a volí před samotným svařováním a lze je korigovat i během svařování. Tyto procesní parametry jsou z velké části závislé na parametrech zdroje. Mezi základní a nejvýznamnější parametry patří svařovací napětí, svařovací proud a rychlost svařování. Pomocí zmíněných parametrů lze vyjádřit měrné vnesené teplo patřící mezi jednu z nejdůležitějších veličin používaných při svařování. Dalšími vstupy, které ovlivňují geometrii svarové lázně, jsou vedení a proudění ve svarové lázni, rychlost podávání drátu, proudová hustota, druh polarity, výlet drátu, sklon a způsob vedení hořáku, množství ochranného plynu, poloha svařování a v neposlední řadě druh přenosu kovu v oblouku. [4]

#### **2. 3. 1. 1. Svařovací proud**

Na tvar průřezu svarové lázně (viz. obr. 2.12.) a na charakter přenosu kovu při svařování má největší vliv velikost svařovacího proudu. Příčinou je fakt, že s růstem proudu roste proudová hustota, dále velikost a tekutost svarové lázně, odtavovací výkon a součinitel tavení. Dále při konstantním napětí na oblouku se při současném zvyšování proudu zvětší výrazný růst hloubky závaru s relativně malým růstem šířky housenky a také převýšení.

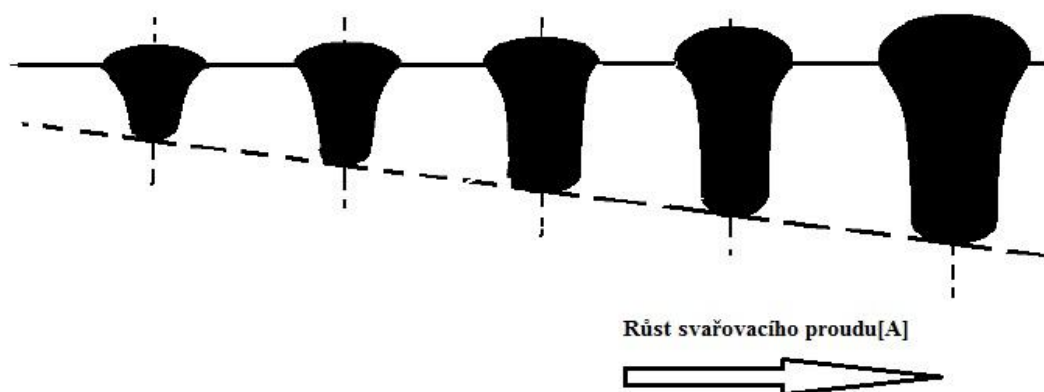
Svařovací proud výrazně ovlivňuje charakter přenosu kovu v oblouku a to tak, že při růstu proudu roste frekvence kapek, dále intenzita proudu ovlivňuje síly, které působí na kapky kovu a růstem proudu se také u běžných typů přenosů kovu zmenšuje objem kapek. [3]

#### **2. 3. 1. 2. Proudová hustota**

Proudová hustota je veličina vyjadřující proudové zatížení svařovacího drátu s ohledem na jeho průřez, proto se udává v jednotkách  $A \cdot mm^2$ . Z toho plyne (při použití



konstantního proudu), že čím je průřez drátu menší, tím větší bude proudová hustota. Její vliv na charakter svařování a geometrii svarové lázně je velice podobný jako u svařovacího proudu a úzce s ním souvisí, protože při růstu proudové hustoty roste hloubka protavení i výkon odtavování drátu, to vše za konstantního napětí. [3]

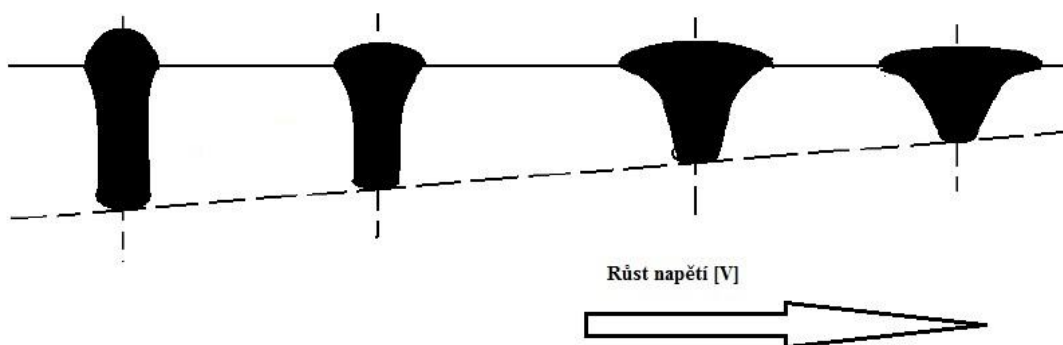


obr. 2. 12: Vliv velikosti proudu na geometrii svarové lázně [19]

### 2. 3. 1. 3. Svařovací napětí

Vlastní napětí na oblouku je rozdíl potenciálů mezi elektrodou a povrchem svarové lázně. Jeho velikost je závislá na délce oblouku a na odtavovací výkon má jen nepatrný vliv. Napětí výrazně ovlivňuje šířku svarové lázně avšak hloubku závaru jen málo. Napětí na oblouku má výrazný vliv na dosažení optimálních podmínek samoregulace oblouku a jeho ustáleného hoření. Dále má vliv na typ přenosu kovu v oblouku. [3]

Nízké napětí může destabilizovat proces. Dále může být příčinou vzniku úzkých svarových lázní s velkým převýšením hlavně při velkých rychlostech svařování. Může také způsobit nedokonalé natavení svarových hran a vznik studených spojů. Naproti tomu nadměrně vysoké napětí protahuje délku oblouku a způsobuje propalování základního materiálu. Svary mohou být náchylné na pórovitost a dále se zvyšuje rozstřík svarového kovu. [3] Na obr. 2.13. je vliv velikosti napětí na geometrii svarové lázně.



obr. 2. 13: Vliv velikosti napětí na geometrii svarové lázně[19]

### 2. 3. 1. 4. Druh a polarita proudu

Při svařování metodou MAG se ve většině případů používá stejnosměrného proudu s elektrodou na kladném pólu zdroje neboli nepřímé polaritě. Důvodem je vyšší teplota na anodě, zvýšená hloubka protavení, malé převýšení a relativně široká svarová lázeň. Přímá polarita, kdy je elektroda na záporném pólu zdroje, se využívá například při navařování. Nevýhodou však je veliký rozstřík svarového kovu. Dále bývá tato polarita využívána u svařování s plněnými dráty a pro mechanizované svařování v úzkém úkosu. [3]

### 2. 3. 1. 5. Výlet drátu a vzdálenost kontaktní špičky

Výlet drátu je vzdálenost, do které se vybíhající drát dostane od kontaktního průvlastku, než se odtaví kapka svarového kovu. Skutečná délka výletu drátu je ovlivněna více atributy a to typem přenosu kovu, použitou ochrannou atmosférou a v neposlední řadě průměrem drátu. [3] Na obr. 2.14. je výlet drátu a vzdálenost kontaktní špičky.

- **Určení velikosti výletu drátu:**

$$L_D = 5 + 5 \cdot d \text{ (pro CO}_2\text{)}$$

$$L_D = 7 + 5 \cdot d \text{ (pro směsné plyny); } d\text{-průměr drátu, } L_D\text{-délka výletu}$$

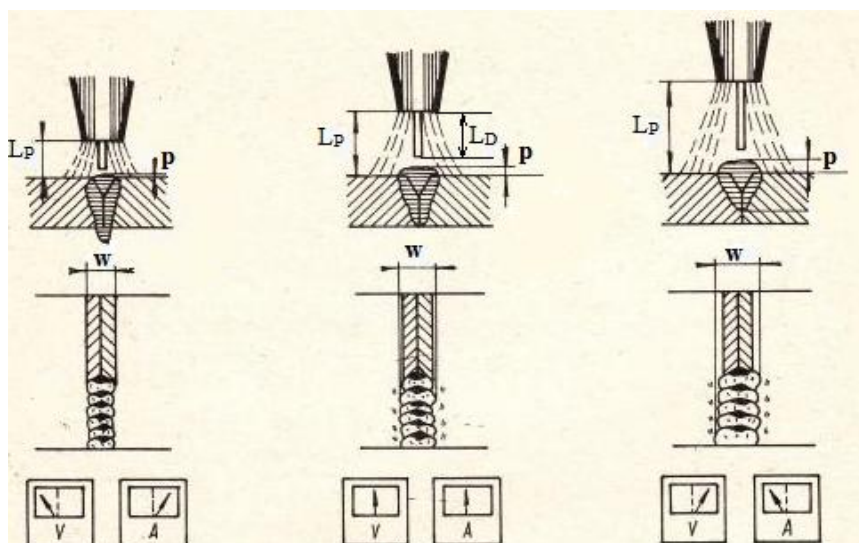
Změnou vzdálenosti kontaktní špičky od základního materiálu se mění řada svařovacích parametrů. Významná je změna proudu, který klesá se zvyšující se vzdáleností, a je způsobena odporovým ohřevem drátu, čímž dochází k mělkému protavování a dále se zvyšuje napětí. [3]

- **Určení vzdálenosti kontaktní špičky od základního materiálu:**

$$L_P = 10 \cdot d + 1 \text{ (zkratový přenos)}$$

$$L_P = 10 \cdot d + 3 \text{ (bezzkratový přenos); } d\text{-průměr drátu, } L_P\text{-vzdálenost špičky}$$

$p$ -převýšení svarové lázně,  $w$ -šířka svarové lázně

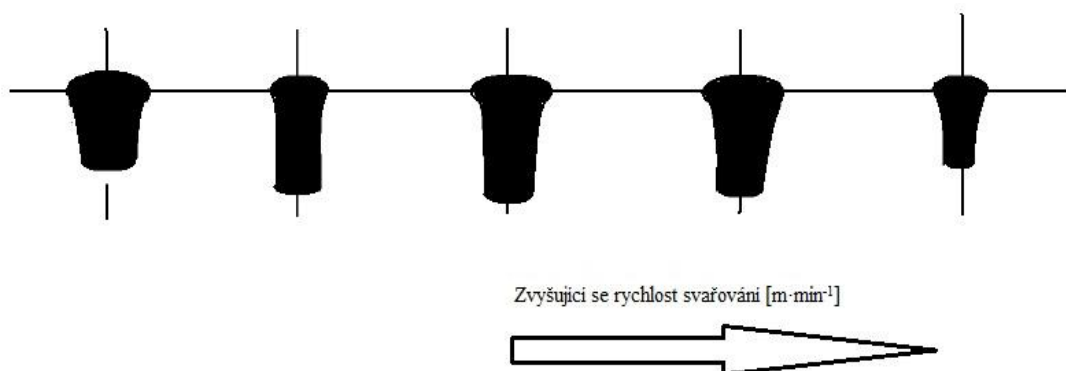


obr. 2. 14: Výlet drátu a vzdálenost kontaktní špičky[20]

### 2. 3. 1. 6. Rychlost svařování

Na velikosti rychlosti svařování je závislý tepelný příkon svařování na jednotku délky svaru, rychlost odevzdání tepla a dále intenzita přehřevu svarových ploch. Tyto parametry nemají vliv jen na geometrii svarové lázně, ale také na podmínky jejího ochlazování. Se zvyšující se svařovací rychlostí se snižuje šířka svarové lázně a roste převýšení svaru. Dále se zvětšuje mírně hloubka protavení, ale pouze jen do takové velikosti svařovací rychlosti, kdy se ještě svarové plochy stačí natavovat. Pokud dojde k dalšímu zvýšení rychlosti, velikost protavení začne naopak klesat. Další nevýhodou vysokých rychlostí je pravděpodobnost vzniku vrubů mezi svarem a základním materiálem. Rychlostí svařování jsou také ovlivněna distribuce napětí a deformací ve svaření. [4]

Co se týká hodnot svařovacích rychlostí, tak ty se pohybují u ručního svařování v rozmezí  $0,1 - 0,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , při strojním navařování až  $1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . [4]



obr.2. 15: Vliv velikosti rychlosti svařování na geometrii svarové lázně[19]

### 2. 3. 1. 7. Vliv ostatních parametrů svařování

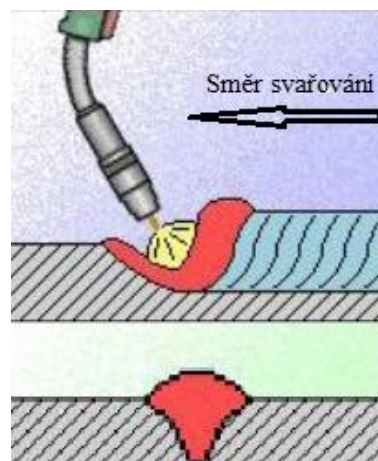
Významný vliv na geometrii svarové lázně mají také poloha a technika svařování. Polohy svařování jsou dány normou ČSN EN ISO 6947. Svařování v polohách je však různě omezeno a to hlavně typem přenosu kovu v oblouku. Při větším dodaném množství tepla a větším množství roztaveného kovu roste riziko, že za velkého působení gravitační síly nad silami povrchového napětí a ostatními silami působícími v oblouku se svarová lázeň nebude schopna udržet na svarových plochách. [4]



obr. 2. 16: Polohy svařování [21]

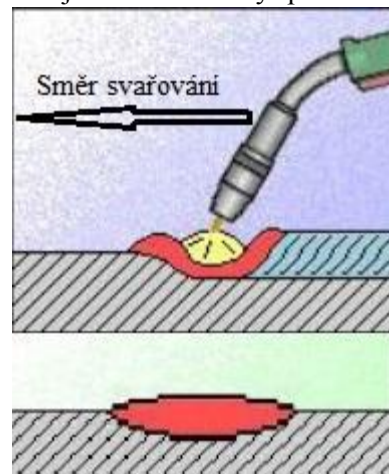
Co se týká techniky svařování, ta je rozdělena na tři základní typy a to svařování vpřed, vzad a vertikální svařování.

- **Svařování vzad** - Výhodou je stabilnější elektrický oblouk, dále je svarová lázeň déle tekutá, tudíž méně náchylná k pórovitosti a u tohoto typu se nevyskytují studené spoje a neprůvary. Mezi další charakteristiky patří větší převýšení a hloubka protavení, hrubší a užší povrch svarové lázně. Nevýhodou je, že hubice zakrývá výhled do úkosu. Využívá se u krycích vrstev tupých svarů a u větších tloušťkách materiálu. Je to nevhodná metoda na kořeny svarů a koutové svary. [12]



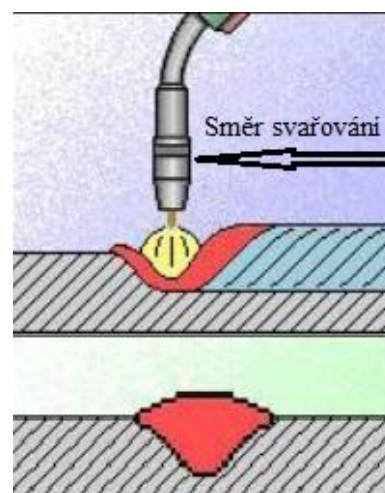
obr. 2. 17: Svařování vzad [12]

- **Svařování vpřed** - Výhodou tohoto vedení je dokonalý výhled do úkosu svaru a dobré ovládání tekuté lázně v kořeni svaru. Dále je zde dokonalý předehřev svarových ploch a nižší převýšení svarové lázně. Na druhou stranu je zde až o 20 % menší hloubka protavení a zároveň větší šířka lázně. Mezi další nevýhody patří fakt, že hubice zakrývá výhled na svarovou lázeň, vyšší rychlost tuhnutí, která může vést k pórovitosti a riziko předbíhání svarové lázně spojené s vznikem studeného spoje. Tento způsob se využívá u svařování tenkých plechů, na svařování kořenů a běžné svářečské práce.[12]



obr. 2. 18: Svařování vpřed[12]

- **Vertikální svařování** - Tento způsob vedení hořáku je vlastně kombinace předchozích dvou vedení a průměrné hodnoty svarové lázně jsou mezi svařováním vpřed a vzad. [12]



obr.2. 19: Vertikální svařování [12]

## 2. 3. 2. Technologické vstupní parametry

Technologické vstupní parametry jsou další velkou skupinou vstupních proměnných v procesu svařování. Obvykle se tyto parametry řídí znalostmi svařovaného materiálu, provozními podmínkami výsledného produktu a konstrukčním řešením svarového spoje. Mezi nejčastěji používané parametry se řadí druh a průměr drátu, druh a množství ochranného plynu (viz.kapitola 2.4.3.), tvar a rozměry svarových ploch (typy svarů), teplota předehřevu, dohřevu nebo interpass teplota a v neposlední řadě tepelné zpracování svarku.[4]

### 2. 3. 2. 1. Teplota předehřevu

Poměrně velká část ocelí, zejména těch s vyšší pevností, je při svařování náchylná na vznik studených trhlin, který je zapříčiněn buď přítomností vodíku ve svarovém spoji, přítomností struktury citlivé na účinky vodíku nebo přítomností zbytkových napětí, hlavně tahových. Jedním způsobem, jak předejít vzniku těchto trhlin, je použití předehřevu. Ten se řídí směrnicemi dle normy ČSN EN 1011. Předehřev dále ovlivňuje výslednou geometrii svarové lázně velmi významnou pro výpočet pevnosti svařovaných ocelových konstrukcí.

Předehřev můžeme definovat jako teplotu, na kterou jsou buď ohřáté celé součásti, nebo dostatečně velké oblasti v místech budoucích svarů, a to bezprostředně před zhotovením svaru nebo v případě vícevrstvých svarů první vrstvy svaru. Díky předehřevu se prodlouží čas, kdy dochází k difuzi vodíku, a tím se eliminuje praskavost za studena. Teplota předehřevu se proto stanovuje buď experimentálně a to zkouškami praskavosti, mezi které patří Tekken, CTS a Implant. Nevýhodou je však vysoká cena těchto zkoušek. Používanějšími metodami k určení teploty předehřevu jsou výpočtové algoritmy, které byly odvozovány pro soubor nejpoužívanějších materiálů, nemají fyzikální základ, ale byly sestavovány pomocí experimentů. K měření teploty předehřevu se obvykle užívají pyrometry, které jsou velmi přesné.

- **Algoritmy pro výpočet teploty předehřevu**

#### **Výpočet dle Seferiána**

Tento algoritmus (1) je vhodný především pro uhlíkové a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku > 0.2% hmotnosti.

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(C_p - 0,25)} \quad (1)$$

$$C_p = C_c + 0,005 \cdot S \cdot C_c$$

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}$$

$T_p$  - teplota předehřevu

$S$  - tloušťka materiálu

$C_c$  - uhlíkový ekvivalent

C, Mn, Cr, Ni, Mo - maximální množství prvků obsažených ve svařovaném materiálu [%hm.]

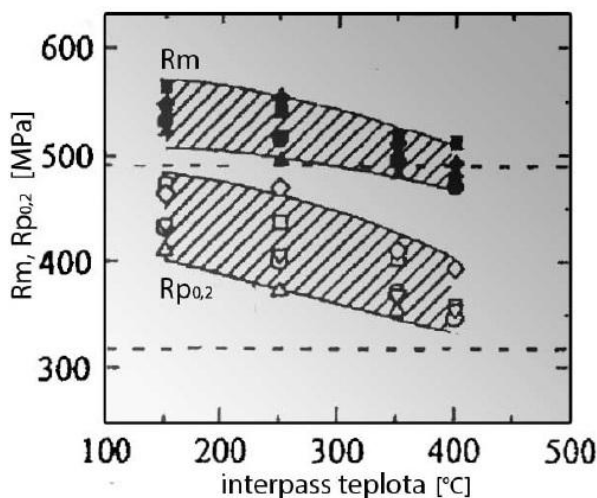
Přehřev bývá realizován buď kyslíko-acetylenovým hořákem a to celoplošným nebo lokálním ohřevem tepelně ovlivněné oblasti nebo se celý svarek ohřívá v indukčních pecích.

Z hlediska svařování uhlíkových ocelí je přehřev jeden z nejdůležitějších aspektů. Přehřev je využíván k eliminaci rychlého ochlazování tepelně ovlivněné oblasti, která je závislá také na množství dodaného tepla. Jak již bylo zmíněno, přehřev dále snižuje riziko vodíkového praskání, vnitřní pnutí ve spoji a tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti. Potřebu použití přehřevu zvyšuje hlavně obsah uhlíku v základním materiálu, obsah legur, rozměry svařence, počáteční teplota svařování, svařovací rychlost a průměr použitého přídavného materiálu. Nutné je ho však použít u materiálu s tloušťkou větší než 25 mm, dále obsahem uhlíku větším než 0,20% nebo uhlíkovým ekvivalentem větším než 0,45% a při svařování s okolní teplotou menší než 5°C. V experimentální části této bakalářské práce je zkoumán vliv teploty přehřevu na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG u tenkých plechů z uhlíkové oceli 11 373 a lze predikovat, že přehřev bude mít pozitivní vliv na geometrii svarové lázně.[13,14,24]

### 2. 3. 2. 2. Teplota interpass

Při svařování vícevrstvých svarů u vysokopevnostních ocelí je také důležitá teplota interpass neboli mezihousesková teplota. Důležitá je hlavně pro dosažení optimálních vlastností a je ji nutné udržovat v určitém rozmezí. Při svařování uhlíkových feritických ocelí je běžně shodná s velikostí teploty přehřevu, pokud však svařovaný materiál přehřev nevyžaduje, měla by mít teplota interpass hodnotu v rozmezí 150 - 200°C.

Pokud dojde k překročení teploty interpass, je pravděpodobné, že budou ovlivněny mechanické vlastnosti svařovaného materiálu. S vysokou teplotou interpass hrozí u uhlíkových feritických ocelí pokles meze kluzu i meze pevnosti. [25]



obr. 2.20: Mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě interpass[25]

### 2. 3. 3. Fyzikálně chemické vstupní parametry

Fyzikálně chemické vstupní parametry patří do skupiny parametrů, které nelze při svařování předem nastavit, lze je jen částečně ovlivňovat. Příčinou omezené modifikace je velké množství ovlivňujících parametrů jako je chemické složení, metalurgické vlastnosti svařovaného materiálu, vliv okolního prostředí na sdílení tepla a také reakce při fázových přeměnách. Mezi nejdůležitější vstupní parametry tedy patří způsob přenosu tepla ve svarové lázni, povrchově aktivní prvky, způsob přestupu tepla do okolí, metalurgické reakce ve svaru a fázové přeměny. [4]

### 2. 4. Ochranné plyny pro svařování metodou MAG

Ochranné plyny jsou jedním z nejzákladnějších technologických parametrů při svařování metodou MAG a mají vliv jak na geometrii svarové lázně, tak na kvalitu svarového spoje či na druh přenosu svarového kovu v oblouku (viz.kapitola 2.2.4.). Charakterizujícím atributem je schopnost chránit tavné lázně před vlivem okolní atmosféry a v neposlední řadě je to ionizace oblasti sloupce oblouku, která je důležitá pro dobrý start, hoření oblouku a chlazení hořáku či elektrody. Pokud by nebyl použit ochranný plyn, přítomnost vzduchu by způsobovala oxidaci, nitridaci, naplynění a pórovitost svarového kovu, což je nežádoucí z důvodu rapidně se zhoršujících mechanických vlastností svarových spojů, a dále by za nepřítomnosti ochranného plynu velmi nepravidelně hořel elektrický oblouk a celkově by nedocházelo k dokonalému přenosu tepelné energie do svaru. [3,8]

Dnes jsou obvykle používány jako ochranné atmosféry jednosložkové nebo vícesložkové plyny různých vlastností projevující se buď neutrálním, oxidačním či nauhličujícím vlivem na svarovou lázeň. Dále jsou plyny rozděleny dle chemického účinku na svarový kov na inertní, redukční, oxidační a nereagující. Druh plynu je proto vždy volen s ohledem na technické a ekonomické ukazatele. Dříve byly ve velké míře používány jednosložkové plyny, především pak  $\text{CO}_2$ , a to kvůli jeho nízkým ekonomickým nákladům. V dnešní době jsou ale naopak aplikovány směsi plynů argonu s oxidem uhličitým či kyslíkem. Je to dáno širokým použitím metody MAG a požadavkem na kvalitní svarové spoje. Jak je již patrné z názvu metody 135 Metal-Active-Gas, jako ochranné atmosféry se používají aktivní plyny a jejich směsi s inertními plyny, které ovlivňují v menší nebo větší míře chemické složení svarového kovu. Mezi tyto plyny patří čistý  $\text{CO}_2$  nebo vícesložkové směsné plyny se základem argonu ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$  nebo  $\text{Ar}+\text{He}+\text{CO}_2+\text{O}_2$ ). Je



doporučeno, aby argon byl obsažen alespoň z 80%, nabízeny jsou však i směsi s nižším podílem. [3,8,15]

## **2. 4. 1. Rozdělení plynů**

- **Oxid uhličitý CO<sub>2</sub>**

Oxid uhličitý je plyn, který je nehořlavý, nejedovatý a bezbarvý, ale pro člověka je ve větší koncentraci ve vzduchu nebezpečný. Jeho teplota varu je -78,45°C, hustota činí 1,976 kg·m<sup>-3</sup>, z čehož je patrné, že je těžší než vzduch (hustota vzduchu je 1,53 kg·m<sup>-3</sup>). Díky této skutečnosti má využití tohoto plynu výhody při aplikaci metody MAG ve všech polohách. Disponuje vysokou tepelnou vodivostí s vysokým přenosem tepla do svarové lázně. Tento fakt spolu s teplem získaným z exotermických oxidačních reakcí, zajišťuje hluboké protavení s oválným profilem svarové lázně, dobré odplynění svarové lázně a také velmi dobré natavení svarových hran. [3,15]

Omezením aplikace tohoto plynu zůstává v přenosu svarového kovu, protože způsobuje vysoké povrchové napětí na roztaveném konci elektrody, což způsobuje dosažení pouze zkratového přenosu kovu a také těžko odstranitelný rozstřík. Obsah oxidů ve svaru a množství strusky na povrchu při aplikaci CO<sub>2</sub> je vysoký a svarová housenka je na pohled hrubá, nerovnoměrná s větším převýšením a poměrně velkým vrubovým účinkem.

Do tlakových lahví se používá CO<sub>2</sub> s minimální čistotou 99,5%, zbytek je tvořen nečistotami a vlhkostí. [3,15]

- **Směsné plyny Ar + 15%-25% CO<sub>2</sub>**

Směsný plyn Ar+CO<sub>2</sub> v poměru 82-18 je dnes jedním z nejpoužívanějších plynů při svařování metodou MAG. Je to univerzální plyn pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Jeho předností jsou dobré svařovací vlastnosti, stabilní elektrický oblouk a velká hloubka protavení. Další výhodou je malý rozstřík svarového kovu, hladký povrch svarové lázně s dobrým bezvrubovým přechodem do základního materiálu, možnost bezzkratového přenosu kovu v oblouku. Použitelný je pro svařování všech tloušťek plechů. [3,15]

## **2. 4. 2. Vliv plynů na stabilitu elektrického oblouku**

Obecně je metoda svařování tavící se elektrodou závislá na stabilním hoření oblouku při všech přenosech kovu. Právě proto jsou používány ochranné atmosféry, které zajistí stabilní hoření a kvalitní ionizaci prostředí oblouku. Z hlediska ionizačních schopností je na tom nejlépe čistý argon. Na druhé straně ale oblouk hoří neklidně a jakost svaru není dobrá,



tudíž není vhodný pro svařování běžných konstrukčních ocelí, u nichž se neobejde svařovací proces bez oxidační reakce, která zaručí čistou svarovou lázeň s dobrými mechanickými vlastnostmi a dále dostatečné protavení a dobrou jakost povrchu svarové lázně. Z důvodů zmíněných okolností se používá malá příměs oxidu uhličitého nebo kyslíku i u svařování korozivzdorných ocelí. [3]

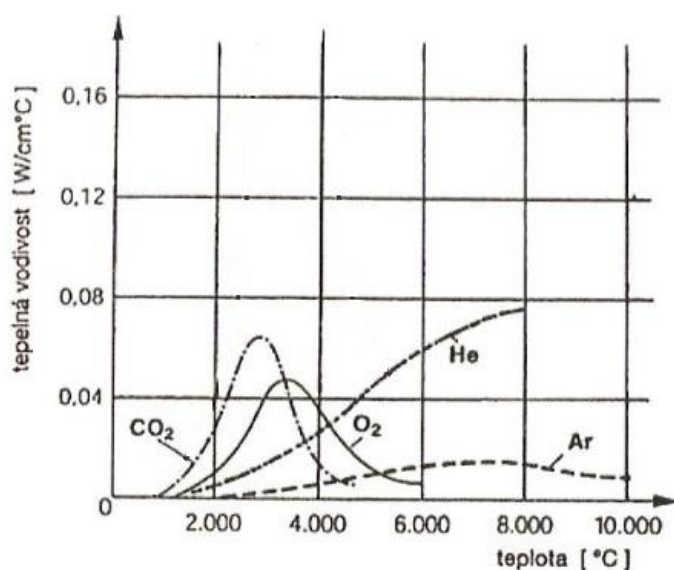
Oxid uhličitý má oproti argonu relativně obtížnou ionizační schopnost, která způsobuje horší zapalování oblouku a celý proces svařování je doprovázen praskavým zvukem při oddělování kapek z drátu. S výhodou jsou proto používány směsi zmíněných plynů, ve kterých oblouk hoří s vysokou stabilitou a pravidelností. [3]

### 2. 4. 3. Vliv množství přiváděného plynu

Množství přiváděného plynu do svařovacího procesu je jedním z nejdůležitějších technologických parametrů (viz. kapitola 2.3.2.) metody MAG a jeho přesné nastavení je velmi důležitým faktorem, jenž ovlivňuje jakost svarové lázně a tím i její mechanické vlastnosti. Pokud je nastaveno malé množství přiváděného plynu, dochází k tomu, že svarová lázeň je nedostatečně chráněna od okolní atmosféry, a tudíž je znečištěna okolní atmosférou. Naopak při nastavení velkého množství přiváděného plynu může dojít k tomu, že právě velký průtok plynu způsobí turbulentní proudění na konci hubice hořáku, a tím může nasát okolní vzduch do ochranné atmosféry. [4]

### 2. 4. 4. Vliv plynů na přenos tepla a profil svarové lázně

Užívání mnoho typů ochranných atmosfér má za následek také různé tepelné vodivosti těchto plynů. Tepelná vodivost plynů je též jedním z technologických parametrů a má výrazný vliv na přenos tepla do svaru a také na geometrii svarové lázně. [3,4]



obr. 2.21. Tepelná vodivost vybraných plynů[4]

## 3. Experimentální část

### 3. 1. Cíle experimentální části

Cílem experimentální části této bakalářské práce, bylo zjištění vlivu různých teplot předehřevu na geometrii svarové lázně koutového svaru při svařování metodou MAG. Obdobný experiment byl již v rámci jiného projektu realizován, tudíž bylo možné predikovat průběh experimentu. Díky této skutečnosti při plánování tohoto experimentu se mohlo vycházet z již nabraných zkušeností při svařování. Základní parametry vytvoření svaru, byly odvozeny z experimentů provedených při jiném typu experimentů provedených při počáteční teplotě základního materiálu 23°C. Vzorky byly svařovány v synergickém režimu zdroje a to z důvodu velmi častého použití této funkce v průmyslové praxi. Hlavním úkolem provedených experimentů bylo zjištění a porovnání vlivu různých teplot předehřevu na vzorky svařované při zkratovém přenosu svarového kovu. Následně byly mezi sebou porovnávány jednotlivé geometrické veličiny svarové lázně a na základě těchto údajů byl stanoven vliv teploty předehřevu. Získané údaje mohou být následně využity při numerických simulacích svařování, speciálně pak pro dvouelipsoidní model zdroje tepla, který velmi dobře popisuje reálný stav u metod svařování elektrickým obloukem. V tab. 3.1. je plán experimentu se vstupními parametry.

Jako základní materiál byla použita konstrukční nízkouhlíková ocel 11 373 a svařována byla v ochranné atmosféře směsného dvousložkového plynu argonu s oxidem uhličitým v poměru 82/18. Tento poměr plynu je nejčastěji využíván ke svařování ocelových konstrukcí. Svařováno bylo za třech různých teplot předehřevu 100, 200 a 300°C při svařovacích rychlostech  $v_s$  0,2-0,5 m·s<sup>-1</sup> a při nastaveném svařovacím proudu 140A. Rychlostí 0,6 m·s<sup>-1</sup> nebylo již svařováno z důvodu malého množství odtaveného svařovacího drátu. Velikost svarové lázně by byla již velmi malá. V tab. 3.1. je plán experimentu se vstupními parametry.

#### 3. 1. 1. Rozdělení experimentální části

- Příprava vzorků
- Svařování vzorků dle předem stanovených vstupních parametrů
- Monitorování svařovacího procesu včetně jeho parametrů
- Rozřezání a příprava vzorků ze svařenců pro následné metalografické zpracování
- Metalografické zpracování a leptání vzorků
- Vyhodnocení geometrie svarové lázně na mikroskopu

Tab. 3.1: Vstupní parametry plánovaného experimentu

Teplota přehřevu [C°]	Nastavená rychlost svařování [m·min <sup>-1</sup> ]			
	0,2	0,3	0,4	0,5
23	X	X	X	X
100	X	X	X	X
200	X	X	X	X
300	X	X	X	X

## 3. 2. Zařízení pro realizaci experimentální části

Samotná experimentální část byla realizována celkem na třech pracovištích. Prvním z nich bylo katedrové pracoviště, ve kterém se nacházela slévárna, nástrojárna a svařovna. Zde byly prováděny počáteční přípravy svislých stojin a stehování vzorků, poté zde bylo prováděno také jejich dělení. Dalším pracovištěm byla laboratoř svařování, v níž byly prováděny veškeré svary, které byly součástí samotného experimentu. Po dělení materiálu, při kterém byly vzorky rozřezány a připraveny pro metalografické zpracování, následoval přesun na poslední pracoviště - metalografickou laboratoř. Zde byly vzorky metalograficky zpracovány, dále byly na mikroskopu nafoceny makrostruktury svarů a pomocí systému NIS Elements AR 2.30. zde byly vyhodnoceny veškeré geometrické rozměry nafocených makrostruktur svarů. Zmíněná pracoviště jsou podrobněji popsána v následujících kapitolách.

### 3. 2. 1. Katedrové pracoviště – příprava vzorků

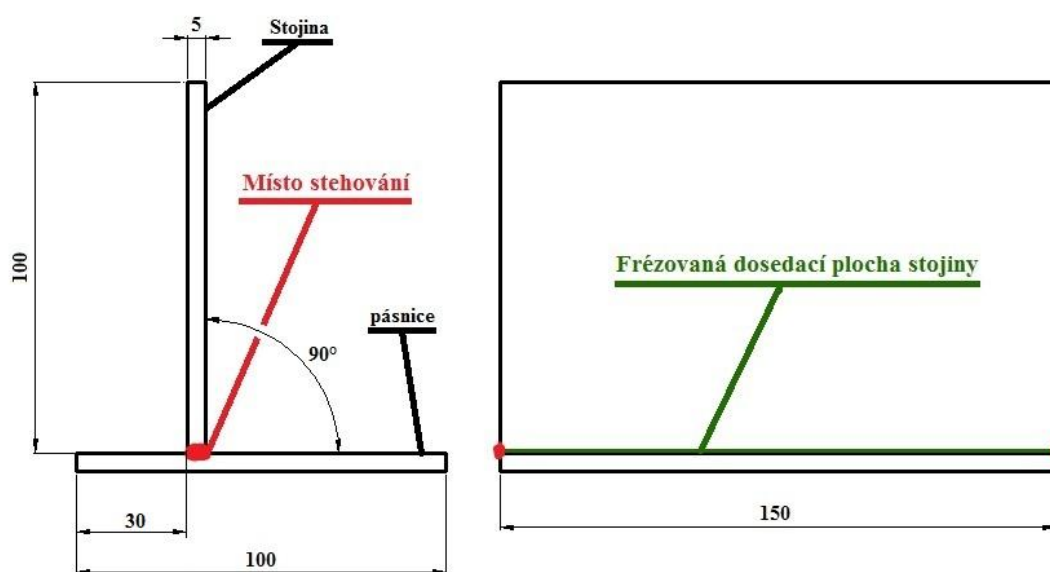
Na katedrovém pracovišti byly provedeny veškeré přípravné práce na vzorcích. Byly zde na vertikální frézce obráběny stojiny, dále zde bylo realizováno stehování a rovnání svařenců a jejich následné rozřezání kyslíko-acetylenovým plamen v horizontální rovině za účelem odebrání vzorků.

K výrobě vzorků byl použit za studena válcovaný plech z materiálu 11 373. Jedná se o konstrukční ocel, u které je tavná svařitelnost zaručená, tudíž je vhodná na aplikaci svařovaných konstrukcí. Mez pevnosti je  $R_m = 440$  MPa a mez kluzu je  $R_e = 250$  MPa. V tab. 3.2. je dle normy ČSN EN 10025-2:2005 uvedeno chemické složení materiálu 11 373.

Tab. 3.2: Chemické složení použitého materiálu

C	Mn	Si	P	S	N <sub>2</sub>	Cu	Ni	Cr	Mo
0,13	0,42	0,195	0,014	0,013	0,006	0,09	0,03	0,05	0,06

Nejprve byl plech rozstříhán na jednotlivé kusy o rozměrech 150x100x5 mm. Rozměr 150x100 je dostatečný pro zaručení dobrého odvodu tepla a získání ustáleného teplotního pole, čímž je zaručen stálý průřez svaru. Po rozstříhání byly na katedrovém pracovišti (viz. kap. 3.2.1.) očištěny a ty, které byly určeny na stojiny, byly obrobeny na frézce tak, aby dosedací plocha byla v celé délce konstantní a tím byla zaručena eliminace ovlivnění geometrie svaru a případné proměnlivé svarové mezery. Tu lze díky obrobení považovat za nulovou. Dále byly na stojiny raznicemi vyraženy čísla pro jejich pozdější identifikaci. Po dokončení přípravných prací byly plechy nastehovány do předem daného tvaru, tak jak je ukázáno na schematickém obrázku 3.11. Stehování bylo provedeno pomocí zdroje Migatronic Navigator 3000 AC/DC. Veškeré stehování proběhlo v přípravku, který zaručoval předepsanou geometrii. Vzorky byly stehovány metodou TIG a na přípravek upínány svěrkami a po stehování následovalo jejich rovnání pro zaručení úplné kolmosti stojiny a pásnice. Na obr. 3.1. je schéma a geometrie stehovaných vzorků.



obr. 3.1: Schéma a geometrie stehovaných vzorků

### 3. 2. 2. Laboratoř svařování

V laboratoři svařování byly provedeny hlavní experimentální práce včetně monitorování všech svařovacích parametrů pomocí systému WeldMonitor. Tato laboratoř je vybavena pracovištěm pro poloautomatické svařování metodami MIG/MAG. Toto pracoviště se skládá ze svařovacího zdroje Migatronic BDH 550 PulsSync, lineárního

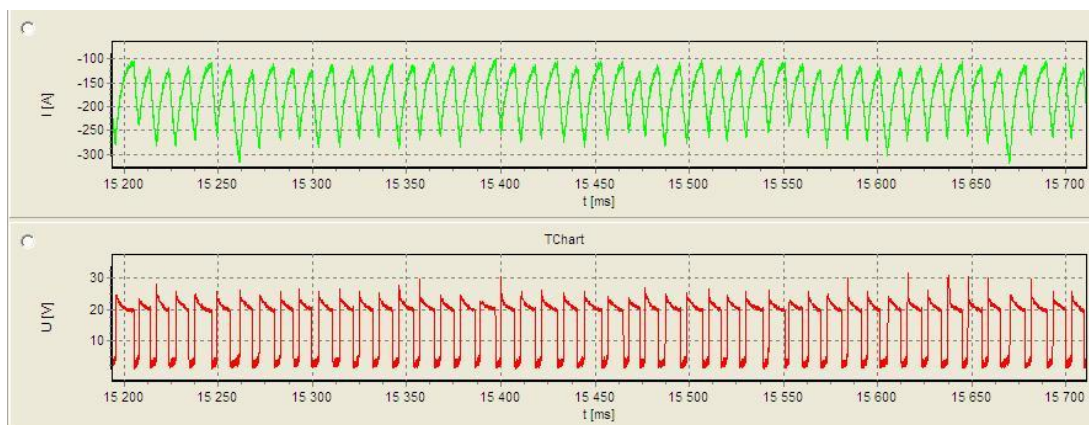
svařovacího automatu s rychlostí pojezdu  $0,2 - 2,3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a ze speciálního svařovacího přípravku na upínání svařenců.

### **Systém WeldMonitor**

Systém WeldMonitor je díky použití moderní digitální techniky vhodný pro monitorování a dokumentaci svařovacího procesu pomocí výpočetní techniky. Díky podrobné dokumentaci procesu svařování je zajištěna snadnější reprodukovatelnost svarových spojů a to v co možná nejvyšší kvalitě. Pomocí tohoto systému je také možno zaznamenávat, zobrazovat a analyzovat svařovací parametry, pomocí kterých mohou být následně odhaleny chyby svarů. Dále zvyšuje kvalitu výroby svařovaných konstrukcí a zároveň snižuje výrobní náklady. Další výhodou použití tohoto systému je možnost archivace dat a celkové zefektivnění a optimalizace výroby.[22] Systém WeldMonitor se skládá s hardwaru a softwaru.

Hardwarová část weldmonitoru se skládá ze souboru měřících modulů, jež jsou připojeny ke svařovacímu stroji a k řídicímu počítači. Během probíhajícího svařovacího procesu měří efektivní hodnoty proudu a napětí obvykle až do frekvenčního rozsahu 12 500 Hz, univerzitní verze měří však ještě s větším frekvenčním rozsahem až 25 kHz, což zaručuje spolehlivou diagnostiku. Lze jím sledovat v reálném čase i více zařízení současně. V rozšířené verzi systému WeldMonitor lze monitorovat také rychlost posuvu drátu, rychlost průtoku a množství ochranného plynu, atmosférické podmínky při svařování a další volitelné veličiny.[4,22]

Softwarová část zařízení WeldMonitor je dána řídicím programem pro PC vyhodnocujícím diagnostiku v reálném čase. Jeho funkcí je zajištění spolehlivých záznamů měřených parametrů a dále je jím umožněno vysoce sofistikované zobrazování reálných nasnímaných dat. Jeho předností je schopnost vést evidenci, dokumentaci a databázovou správu. Celý systém je kompatibilní s OS Windows. Dalšími funkcemi systému jsou monitorování procesu svařování, zobrazení a záznam údajů v reálném čase na displeji řídicího počítače, možnost analyzovat parametry svařování, tisknout parametry, grafy a dále nákladová optimalizace a odhad nákladů pro svarové spoje.[22] Na obr. 3.2. je ukázán příklad záznamu z programu WeldMonitor. Jedná se o údaj hodnoty svařovacího proudu a napětí vzorku S5c239.



obr. 3.2: Ukázka záznamu svařovacího napětí a proudu z WeldMonitoru u vzorku S5c239

### **Svařovací zdroj Migatronik BDH 550 PulsSync**

Migatronik BDH 550 PulsSync je svařovací zdroj invertorového typu s možností svařování v pulzním režimu a také se synergickým ovládáním. Je určen pro svařovací metody 131 a 135. Mezi přednosti synergického ovládání zdroje se řadí automatické nastavení všech sekundárních parametrů svařovacího zdroje. Součástí zdroje je ruční a automatizovaný hořák určený na svařování oceli a dále speciální hořák pro svařování hliníku. Na svařování vzorků byl pro tento experiment použit hořák pro automatizované svařování, který je mechanicky spojen s lineární pojezdovou dráhou a jeho délka je také předurčena k simulaci robotického svařování. V sestavě s polohově stavitelným přípravkem je pak umožněno svařovat poloautomaticky v horizontální poloze hořáku, přičemž lze monitorovat svařovací parametry pomocí systému WeldMonitor

### **Svařovací přípravek**

Speciální svařovací přípravek slouží na upínání svařovacích vzorků. Je polohově nastavitelný, lze pomocí něj upnout jak vzorky určené pro koutové svary, tak vzorky určené pro svary tupé. Přípravek je zkonstruován takovým způsobem, aby byl zajištěn úhel mezi svařencem a hořákem. Další jeho funkcí je předem definovaný odvod tepla ze svařovaného materiálu. V tomto experimentu byly do přípravku upínány vzorky určené pro koutové svary. Na obr. 3.3. je svařovací přípravek včetně pojezdového zařízení.

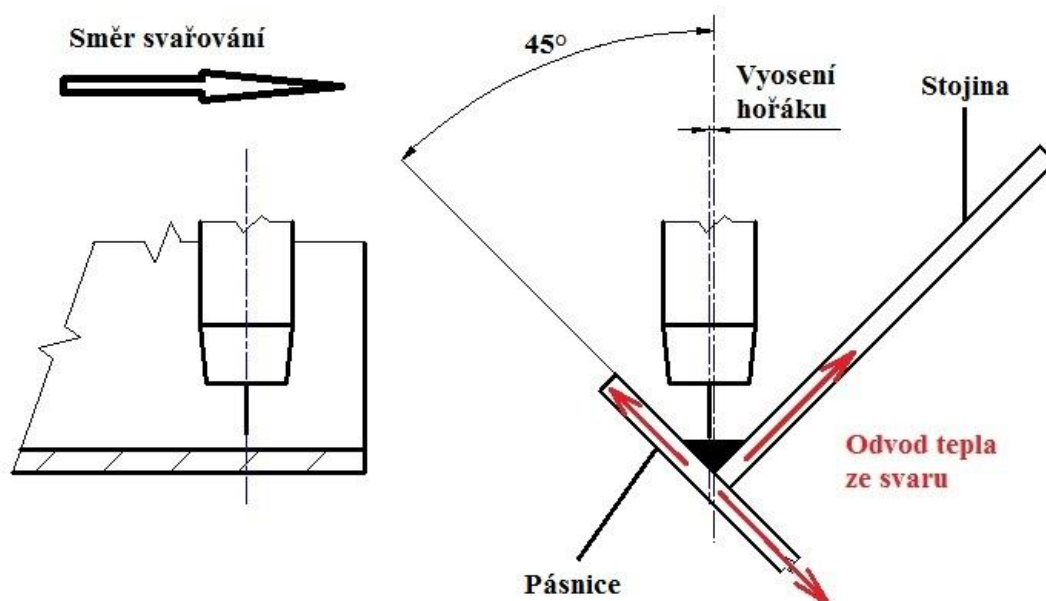


*obr. 3.3: Přípravek na upínání svařovaných vzorků*

### **Svařování vzorků**

Před vlastním svařováním byly vzorky nejprve postupně předehřívány v indukční peci. Všechny vzorky byly předehřáty na teplotu 400°C. Poté byly vyjmuty z pece a vloženy do svařovacího přípravku. Zde byla snímána povrchová teplota vzorku a při dosažení příslušné hodnoty předehřevu byl zapálen oblouk a vytvořen svar.

Procesní parametry byly nastaveny podle plánu experimentů a každé nastavení bylo použito pro teplotu vzorku 23, 100, 200 a 300°C. Svařování bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 6947 v poloze PA pod úhlem 45° do úžlabí. Na základě předchozích zkušeností ze svařování ve zkratovém režimu byl hořák vyosen o 0,8 - 1 mm za účelem eliminace excentricity svarové lázně. Ta je v tomto případě u nižších svařovacích proudů způsobena větším odvodem tepla v oblasti pásnice. Osa hořáku svírala s rovinou svaru úhel 90° a s rovinou kolmou na směr svařování byla rovnoběžná. Na obr. 3.4. je schéma celého postupu svařování.



obr.3.4: Schéma postupu svařování

Jako přídavný drát byl použit drát ESAB OK AUTROD 12.51 o průměru 1,2 mm a ochranná atmosféra dvousložkového směsného plynu od firmy AIRPRODUCTS EUROMIX® M21.

OK AUTROD je poměděný drát určený ke svařování nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností do 530 MPa a dále jemnozrných ocelí s minimální mezí kluzu 420 MPa. Jeho mechanické vlastnosti jsou lepší než vlastnosti svařovaného materiálu. Mez pevnosti  $R_m = 560$  MPa a mez kluzu  $R_e = 470$  MPa. Je ho vhodné používat spolu s ochrannou atmosférou Ar/CO<sub>2</sub> nebo v čistém CO<sub>2</sub>. V tab.3.3. je chemické složení svařovacího drátu.

Tab. 3.3. Chemické složení svařovacího drátu

C [%]	Si [%]	Mn [%]
0,1	0,9	1,5

Ochranný plyn EUROMIX ® M21. Výrobce AIR PRODUCT vyrábí a plní tento plyn dle standardních postupů ověřených v rámci certifikace systému řízení jakosti dle norem ISO 9001:2000. Je vhodný pro ochranné atmosféry určené pro svařování konstrukčních uhlíkových ocelí elektrickým obloukem metodou MAG. Tento dvousložkový plyn obsahuje složky v poměru 82Ar/18CO<sub>2</sub>. Tlakové lahve jsou plněny při teplotě 15°C na tlak 30 MPa. Směs EUROMIX ® M21 je v souladu s normou ČSN 14 175 a plně vyhovuje jejím požadavkům na minimální čistoty jednotlivých plynů a udané tolerance směsných poměrů. V tab. 3.4. je chemické složení směsi M21.



Tab.3.4: Chemické složení směsi plynu M21

oxid uhlíčitý	vlhkost	argon
18%	< 5 ppm	zbytek

## Hodnoty získané systémem WeldMonitor

V průběhu svařování byly pomocí systému WeldMonitor (viz.kap.3.2.2.) monitorovány skutečné svařovací parametry frekvencí záznamu 25 kHz. Jednalo se o efektivní proud, efektivní napětí, skutečná rychlost svařování, rychlost posuvu drátu a množství ochranného plynu. Tyto veličiny byly zaznamenávány do externího počítače, kam byly následně i ukládány.

Důležitým výstupním parametrem byla hodnota vneseného tepla na jednotku délky svaru. Vnesené teplo se vypočítá podle vzorce (2).

$$Q = \frac{U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \eta}{v_s \cdot 1000} = [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2)$$

$U_{ef}$  - efektivní hodnota napětí [V]

$\eta$  - účinnost přenosu tepla [-]

$I_{ef}$  - efektivní hodnota proudu [A]

- pro metodu MAG  $\eta = 0,84$

$v_s$  - rychlost svařování [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

V tab. 3.5. a 3.6. jsou uvedeny nastavené, změřené i spočítané hodnoty parametrů svařování.

Tab.3.5: Monitorované a nastavené hodnoty parametrů při svařování

Zkratová oblast	$I_{nastavé}$ [A]	$V_{nastavená}$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	Přehřev [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Čas [s]	$I_{efektivní}$ [A]	$U_{efektivní}$ [V]
T300S5c239	140	0,2	300	36,0	179,8	18,0
T300S5c240	140	0,3	300	26,0	177,1	17,9
T300S5c241	140	0,4	300	19,0	171,5	18,0
T300S5c242	140	0,5	300	15,0	167,0	18,1
T200S5c243	140	0,2	200	35,0	182,2	17,9
T200S5c244	140	0,3	200	25,0	177,2	17,9
T200S5c245	140	0,4	200	17,0	171,3	18,0
T200S5c246	140	0,5	200	15,0	168,3	18,0
T100S5c247	140	0,2	100	38,0	183,1	17,8
T100S5c248	140	0,3	100	26,0	177,4	17,9
T100S5c249	140	0,4	100	19,0	172,9	17,9
T100S5c250	140	0,5	100	15,0	169,0	18,0
T23S5c006	140	0,2	23	37,0	183,1	17,7
T23S5c007	140	0,3	23	26,0	178,9	17,7
T23S5c008	140	0,4	23	18,0	176,2	17,8
T23S5c009	140	0,5	23	15,0	172,2	17,8

Tab. 3.6: Monitorované hodnoty parametrů při svařování

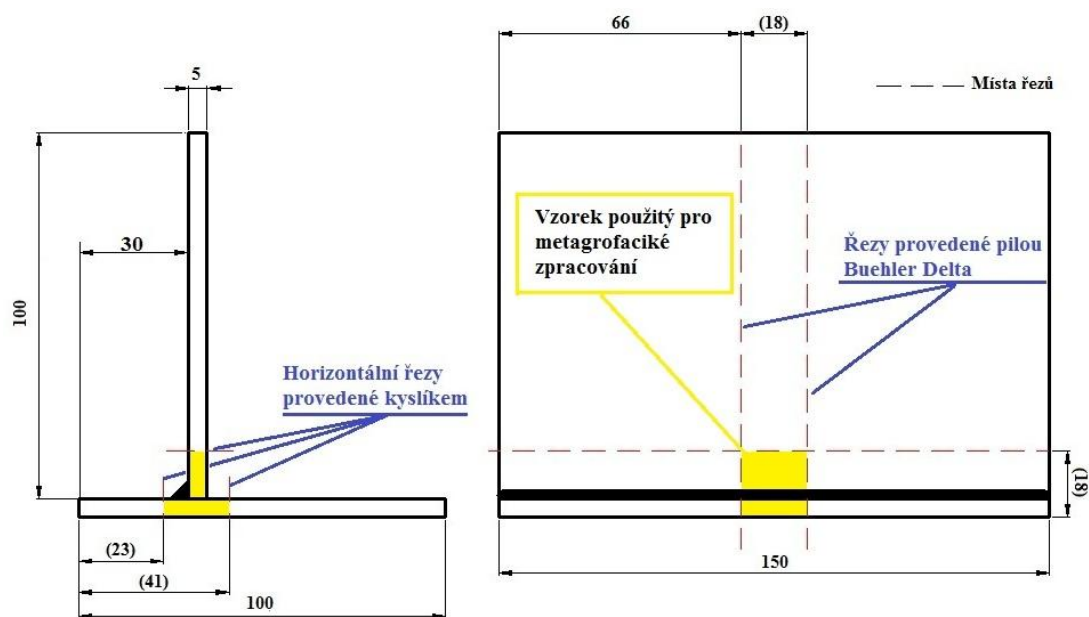
Zkratová oblast	Vnesené teplo [kJ·cm <sup>-1</sup> ]	Rychlost drátu [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost svařování [m·min <sup>-1</sup> ]	Průtok plynu [l/min]
T300S5c239	7,45	3,671	0,219	15
T300S5c240	5,02	3,674	0,318	15
T300S5c241	3,74	3,676	0,416	15
T300S5c242	2,96	3,676	0,514	15
T200S5c243	7,72	3,699	0,213	15
T200S5c244	5,04	3,701	0,317	15
T200S5c245	3,74	3,702	0,416	15
T200S5c246	2,96	3,7	0,516	15
T100S5c247	7,90	3,7	0,208	15
T100S5c248	5,16	3,701	0,31	15
T100S5c249	3,78	3,699	0,413	15
T100S5c250	2,95	3,701	0,519	15
T23S5c006	7,34	3,638	0,196	15
T23S5c007	4,77	3,639	0,295	15
T23S5c008	3,52	3,641	0,396	15
T23S5c009	2,76	3,643	0,494	15

### 3. 2. 3. Příprava vzorků na metalografické zpracování

Poté, co byly svarky v laboratoři svařování dokončeny, byly na katedrovém pracovišti z každého z nich odebrány vzorky s rozměry vhodnými k metalografickému zpracování. Vzorky byly odebírány z míst s již ustáleným teplotním polem. Odebírání vzorků probíhalo současně na dvou pracovištích. Na prvním z nich - katedrovém pracovišti - byly provedeny horizontální řezy kyslíko-acetylenovým hořákem RS 26.

Poloautomatické zařízení RS 26 určené pro řezání kyslíko-acetylenovým plamenem je také vybaveno pojezdovým zařízením, na kterém se celé řezací zařízení pohybuje. Jeho součástí je dále elektronické ovládání, jímž lze ovládat rychlost pojezdového zařízení a tím vlastní rychlost řezání

Na obr. 3.5. je schéma řezání a odebírání vzorku ze svarků.



obr. 3.5: Schéma řezání a odebíraného vzorku

Po provedení horizontálních řezů byly zbytky svarků očištěny od zbytečných okují vzniklých při řezání plamenem.

### 3. 2. 4. Metalografická laboratoř

Metalografická laboratoř se skládá z více pracovišť. Při práci na experimentu byla využita dvě pracoviště. První z nich - přípravná vzorků, kde probíhalo vyřezávání vzorků na pile Buehler Delta AbrasiMet, jejich zalití do dentacrylu, broušení a leštění na brusce Buehler Phoenix 4000 a následné leptání v roztoku nitalu. Na druhém pracovišti bylo realizováno vlastní vyhodnocení vzorků na mikroskopu Carl Zeiss Jena-Neophot 21, na kterém je možno společně s připojenou digitální kamerou Nikon DS-L1 a systémem NIS Elements 2.30 snímat a vyhodnotit makra a mikrostruktury metalografických výbrusů.

Vzorky předpřipravené pomocí kyslíko-acetylenového řezání, byly dále děleny vertikálními řezy na metalografické pile Buehler Delta AbrasiMet za použití vodního chlazení. Z důvodu následné úspory pryskyřice dentacryl zde byly vyextrahovány vzorky dlouhé 18 mm. Místo odběru vzorku je ukázáno na obr. 3.5.

Metalografická pila Buehler Delta AbrasiMet pila je vybavena velmi účinným cirkulačním chlazením, jehož součástí je velká sedimentační nádrž ve tvaru kvádra, jež je vybavena přepážkami a filtry a jako chladicí medium je použita emulgovaná voda. Díky účinnému chlazení je zaručený krátký řezací čas a dále fakt, že vyřezávaný vzorek nebude tepelně a deformačně ovlivněn v oblasti dělicí roviny. Řezací proces je ovládán pákou

pohybující se po kruhové trajektorii současně s řezacím kotoučem a motorem, který je vyvážený pružinami pro eliminaci nevyváženosti soustavy.

Poté, co byly vzorky odebrány, následovalo jejich zalití do formiček o průměru 30 mm. Jako materiál k zalití byl použit dentacryl. Po zalití zreagoval s okolní atmosférou, a tím se z něho stal amorfni materiál. Do každé formičky byl pro pozdější identifikaci společně se vzorkem zalit identifikační papírek s číslem vzorku. Po vytvrdnutí dentacrylu byly zalité vzorky vyndány z formiček a následně postupně broušeny na metalografické brusce Buehler Phoenix 4000. Broušení proběhlo za použití brusného papíru s různou hrubostí zrn karbidu křemíku. Na hrubé broušení byly užity brusné papíry s označením drsnosti 100, poté 240, 400 a na konečnou fázi broušení brusné papíry s drsností 600. Jako smáčedlo byla při broušení použita voda, která byla přiváděná trubičkou s tryskou přímo do centra broušení vzorků. Po vybroušení vzorků následovalo jejich leštění na stejném zařízení. K leštění bylo použito smáčedlo pro diamantové suspense Metadi Fluid a diamantová suspense Buehler o zrnitosti 3  $\mu\text{m}$ .

Poloautomatická bruska a leštička Buehler Phoenix 4000 je velmi variabilní zařízení. Je na něm možné volit různé otáčky a jejich směr, dobu brusného nebo lešticího procesu, dále je zde možnost nastavení velikosti přitlaku na vzorky uložené v unášeci a to buď centrálním, nebo individuálním přitlakem. Brusné papíry jsou přilepeny na ocelovém plechu kruhového průřezu a na unášec jsou magneticky přichyceny. Výhodou toho je jednoduchá a rychlá výměna různých typů brusných papírů.

Konečnou fází metalografického zpracování bylo leptání, při němž nedochází k odebrání materiálu, ale k vyvolání struktury svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Jako leptadlo byl použit 3% roztok kyseliny dusičné v ethanolu Nital. V něm byly vzorky máčeny dle velikosti svaru po dobu 6 - 10 s. Tato doba nesměla být překročena, protože by docházelo k přeleptání vzorku, který by musel následně být znovu přeleštěn. Po očištění a osušení vzorků následovalo jejich přesunutí k mikroskopu a následné vyhodnocení.

### 3. 3. Vyhodnocování experimentálních prací

#### 3. 3. 1. Vyhodnocení svařovaných vzorků

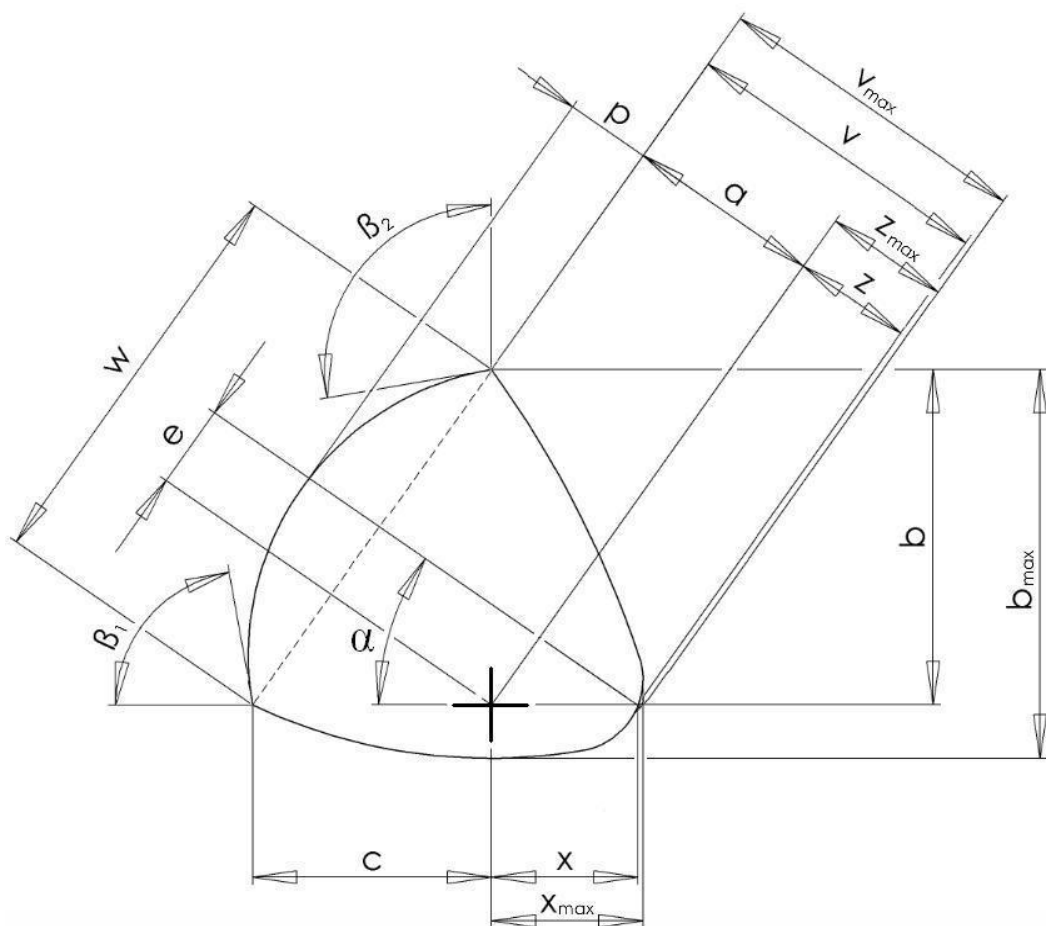
Vyhodnocování probíhalo na mikroskopu Carl Zeiss Jena-Neophot 21, na kterém byly snímány makrostruktury metalografických výbrusů svarových lázní pomocí kamery Nikon DS-L1, propojené s počítačem s nainstalovaným softwarem NIS-Elements 2.3.

Neophot 21. je světelný optický metalografický mikroskop určený pro vyhodnocování mikro a makro struktur metalografických výbrusů. Na optickém zařízení je zabudována kamera Nikon DS-L1, která je propojena s počítačem, v němž je nainstalovaný software NIS-Elements. NIS-Elements Software je jedním z nejpoužívanějších softwarů určených pro obrazovou analýzu. Díky propracovanému ovládání lze bez problémově měřit veškeré jedno i dvojrozměrné údaje vzorků. Vybavení tohoto programu se liší podle verzí. Hlavním atributem je náročnost provádění obrazové analýzy. Na obr. 3.6. je mikroskop Neophot 21 a ukázka snímání vzorku do softwaru NIS-Elements.

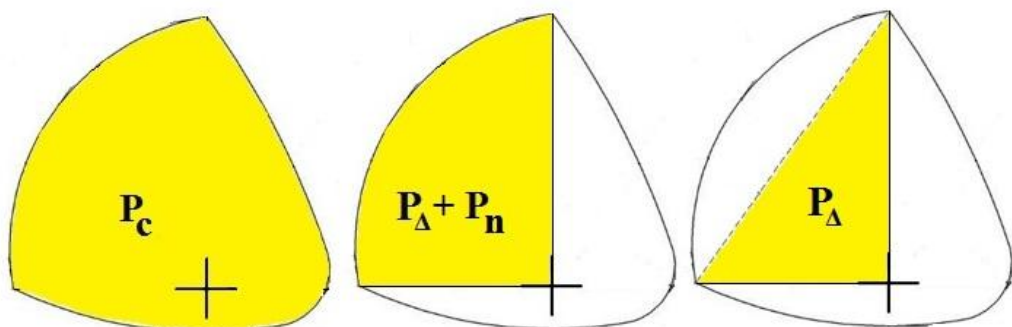


*obr. 3.6: Mikroskop Neophot 21 a snímání vzorek v softwaru NIS-Elements*

Při geometrickém vyhodnocení metalograficky zpracovaných vzorků byl vždy vzorek nasnímán a uložen pomocí NIS Elements do počítače. Dalším krokem byla rozměrová analýza geometrie nafoceného makrovýbrusu svaru. Tímto způsobem byly analyzovány všechny vzorky. Na obr. 3.7. jsou zobrazeny veškeré geometrické rozměry naměřené pomocí NIS Elements. Dále jsou na obr. 3.8. zobrazeny plochy, které byly také pomocí NIS Elements analyzovány.



obr. 3.7: Geometrické rozměry svarové lázně [26]



obr. 3.8: Plochy analyzované pomocí systému NIS Elements

Z analyzovaných rozměrů geometrií svarových lázní jsou pro potřeby numerických simulací svařování nejdůležitějšími parametry " $w$ " - šířka svarové lázně, " $v_{\max}$ " - maximální hloubka protavení, a " $L_c$ " - délka svarové lázně a celková velikost svaru  $P_c$ . Další velice důležitou geometrickou veličinou je velikost koutového svaru " $a$ ". Velikost koutového svaru " $a$ " patří mezi nejdůležitější technické údaje. Tento parametr je při navrhování svarových konstrukcí využíván jako základní konstrukční a technologický výpočtový údaj. Na obr. 3.9. je zobrazen způsob měření délky svarové lázně.



obr. 3. 9: Způsob měření délky svarové lázně

V tab. 3.7. a 3.8. jsou veškeré analyzované geometrické rozměry svarových lázní měřených v tomto experimentu.



Tab.3.7: Analyzované hodnoty geometrie svarových lázní

Zkratová oblast	$I_{\text{nastavené}}$ [A]	$V_{\text{nastavená}}$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Teplota přehřevu [°C]	a [mm]	b [mm]	$b_{\text{max}}$ [mm]	c [mm]	e [mm]	p [mm]	w [mm]	z [mm]	$z_{\text{max}}$ [mm]
S5c239	140	0,2	300	3,7122	5,2399	6,4976	5,2721	0,01	1,0793	7,4339	0,4909	0,8866
S5c240	140	0,3	300	3,176	4,6524	5,5676	4,3749	-0,0942	0,7806	6,3617	0,714	0,8907
S5c241	140	0,4	300	3,0463	4,4987	5,4537	4,1487	-0,1245	0,377	6,111	0,6799	0,8937
S5c242	140	0,5	300	2,7768	3,9595	4,8545	3,9041	-0,0263	0,243	5,554	0,4967	0,7239
S5c243	140	0,2	200	3,6131	5,3857	6,0363	4,8781	-0,1797	1,419	7,2661	0,6572	0,6572
S5c244	140	0,3	200	3,3025	4,7395	5,2652	4,6052	-0,044	0,749	6,6127	0,4255	0,4255
S5c245	140	0,4	200	2,8568	4,3289	4,7434	3,7978	-0,1906	0,5451	5,7595	0,4353	0,4353
S5c246	140	0,5	200	2,5965	3,9747	4,1939	3,431	-0,1938	0,5931	5,2485	0,4198	0,4198
S5c247	140	0,2	100	3,6445	5,2816	6,0036	5,0354	-0,0861	1,5435	7,2989	0,4184	0,4184
S5c248	140	0,3	100	3,1807	4,7009	5,1615	4,3251	-0,1351	1,0172	6,3817	0,5234	0,5234
S5c249	140	0,4	100	2,8816	4,2637	4,8026	3,9183	-0,1181	0,6703	5,7932	0,3423	0,3928
S5c250	140	0,5	100	2,5407	3,5544	3,9849	3,6157	0,0218	0,6614	5,0722	0,2067	0,2571
S5c006	140	0,2	23	3,677	5,16	5,761	5,2529	2,099	1,688	7,331	0,083	0,174
S5c007	140	0,3	23	3,2228	4,6433	4,6816	4,4328	0	1,2018	6,4293	0	0,005
S5c008	140	0,4	23	2,9634	4,0208	4,6335	4,3689	0,0874	0,6404	5,9274	0,0811	0,1956
S5c009	140	0,5	23	2,6913	3,6888	4,256	3,9143	0	0,7392	5,3716	0	0,0629

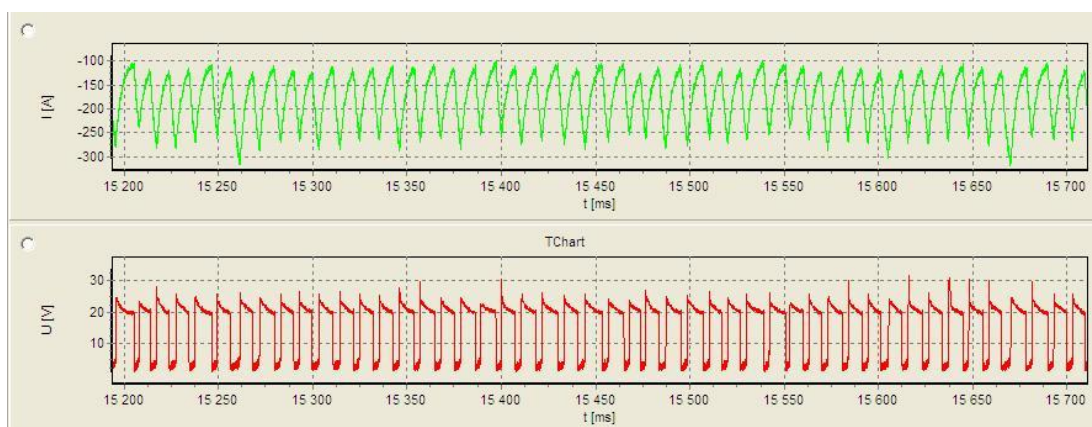


Tab.3.8: Analyzované hodnoty geometrie svarových lázní

Zkratková oblast	x [mm]	x <sub>max</sub> [mm]	v [mm]	v <sub>max</sub> [mm]	α [°]	β <sub>1</sub> [°]	β <sub>2</sub> [°]	P <sub>C</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>Δ</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>a</sub> +P <sub>Δ</sub> [mm <sup>2</sup> ]	L [mm]
S5c239	0,6889	0,6889	4,2031	4,5988	45,24	120,31	122,86	22,586	13,779	17,855	13,39
S5c240	0,9742	0,9919	3,89	4,0667	43,45	114	118,11	16,6489	10,175	12,688	12,12
S5c241	0,9141	0,9237	3,7262	3,94	42,75	119,37	129,2	14,2314	9,3003	10,377	11,61
S5c242	0,6841	0,7299	3,2735	3,5007	44,66	116,95	111,22	11,6908	7,6949	8,1176	10,46
S5c243	0,8914	1,1904	4,2703	4,2703	42,21	107,79	112,8	22,93	13,112	18,947	12,47
S5c244	0,5482	0,7855	3,728	3,728	44,18	124,93	120,73	15,8338	10,917	13,293	11,20
S5c245	0,5866	0,8235	3,2921	3,2921	41,21	121,92	120,47	12,4205	8,2127	9,7289	10,62
S5c246	0,5451	0,9909	3,0163	3,0163	40,82	108,03	115,99	11,1413	6,8034	8,1627	10,41
S5c247	0,5933	0,7989	4,0629	4,0629	42,63	100,51	108,55	22,7678	13,294	19,294	12,19
S5c248	0,7009	0,954	3,7041	3,7041	42,66	113,92	116,1	16,1481	10,13	12,938	10,19
S5c249	0,4227	0,5791	3,2239	3,2744	42,66	113,65	117,7	12,8683	8,3349	10,209	10,38
S5c250	0,299	0,5183	2,7474	2,7978	45,36	117,74	111,65	10,0825	6,4305	8,697	10,07
S5c006	0,159	0,624	3,76	3,851	45,34	122,01	109,77	22,1304	13,682	20,017	11,25
S5c007	0	0,7944	3,223	3,228	43,42	134,18	115,51	15,6267	10,436	14,396	11
S5c008	0,1362	0,323	3,045	3,159	47,39	134,3	129,82	12,5613	8,9052	10,545	9,15
S5c009	0	0,1186	2,654	2,69	43,88	134	135,94	9,6504	6,0193	8,1352	9,1

### 3. 3. 2. Ukázka vyhodnocení vzorku S5c239

Koutový svar ze vzorku S5c239 byl svařován dle plánu experimentu (viz. tab. 3.1). Nastavený svařovací proud byl  $I = 140 \text{ A}$ , nastavená rychlost svařování byla  $v_s = 0,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a svařováno bylo s teplotou přehřevu  $T = 300^\circ\text{C}$ . Během svařovacího procesu byly monitorovány všechny vstupní parametry. Na obr.3.10. je záznam efektivního proudu a napětí svaru S5c239 ze systému WeldMonitor v grafické podobě. V tab. 3.9. jsou svařovací parametry v podobě textové.



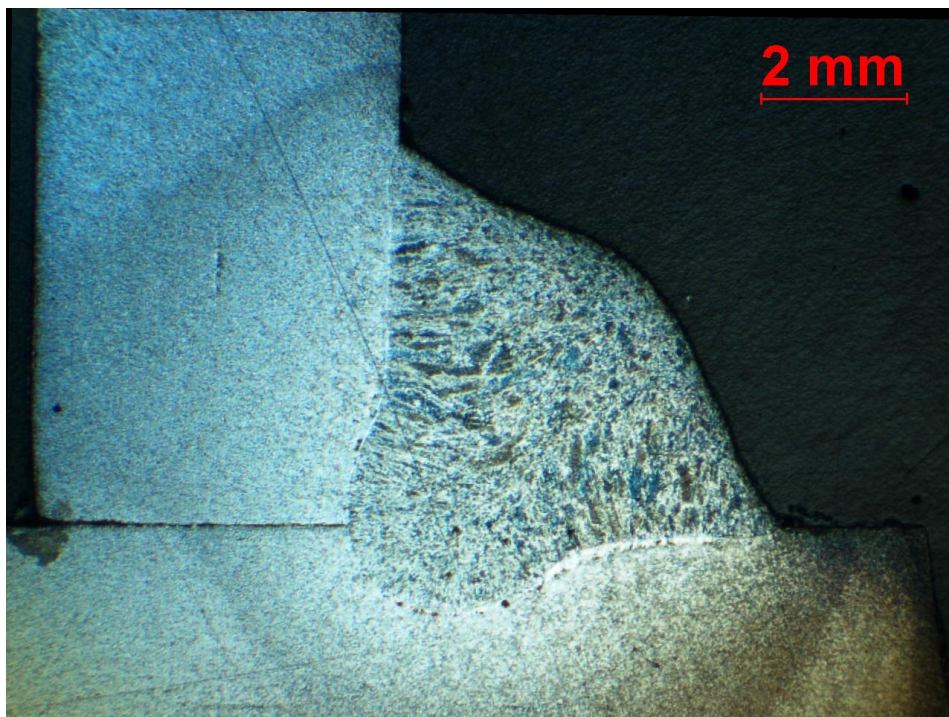
obr. 3.10: Grafický průběh efektivního proud a napětí

Tab. 3.9: Svařovací parametry

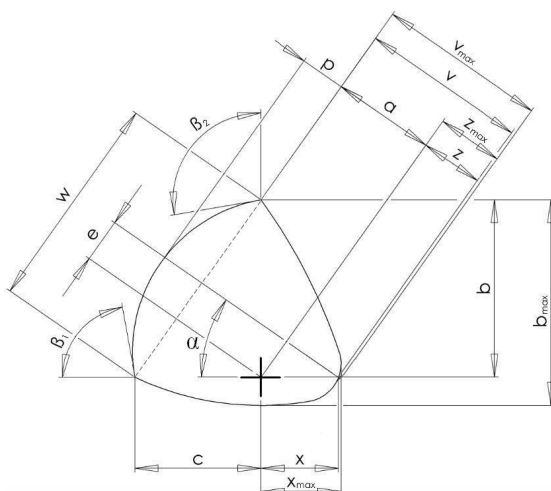
Zkratová oblast - T300S5c239				
$I_{\text{nastavený}}$ [A]	$v_{\text{nastavená}}$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Přehřev [°C]	Čas [s]	$I_{\text{efektivní}}$ [A]
140	0,2	300	36	179,8
$U_{\text{efektivní}}$ [V]	Vnesené teplo [kJ·cm <sup>-1</sup> ]	Rychlost drátu [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost svařování [m·min <sup>-1</sup> ]	Průtok plynu [l·min <sup>-1</sup> ]
18	7,4482	3,671	0,219	15

Na základě předchozích zkušeností byl svařovací hořák vyosen ve směru pásnice o 0,8 – 1 mm (viz. obr. 3.4., kap.3. 2. 2.). Důvodem vyosení je nerovnoměrný odvod tepla stojinou a pásnicí. Tímto opatřením se eliminovala nesymetričnost svaru. Na obr. 3.11. je

metalografický výbrus svaru S5c239. Dále na obr. 3.12. jsou vyhodnocované rozměry svarové lázně.



obr. 3.11: Makrostruktura svaru S5c239



a) Analyzované geometrické rozměry[26]



b) Příklad měření délky svarové lázně

obr. 3.12: Rozměrová analýza

V tab. 3.10. jsou uvedeny všechny analyzované geometrické rozměry svaru S5c239.



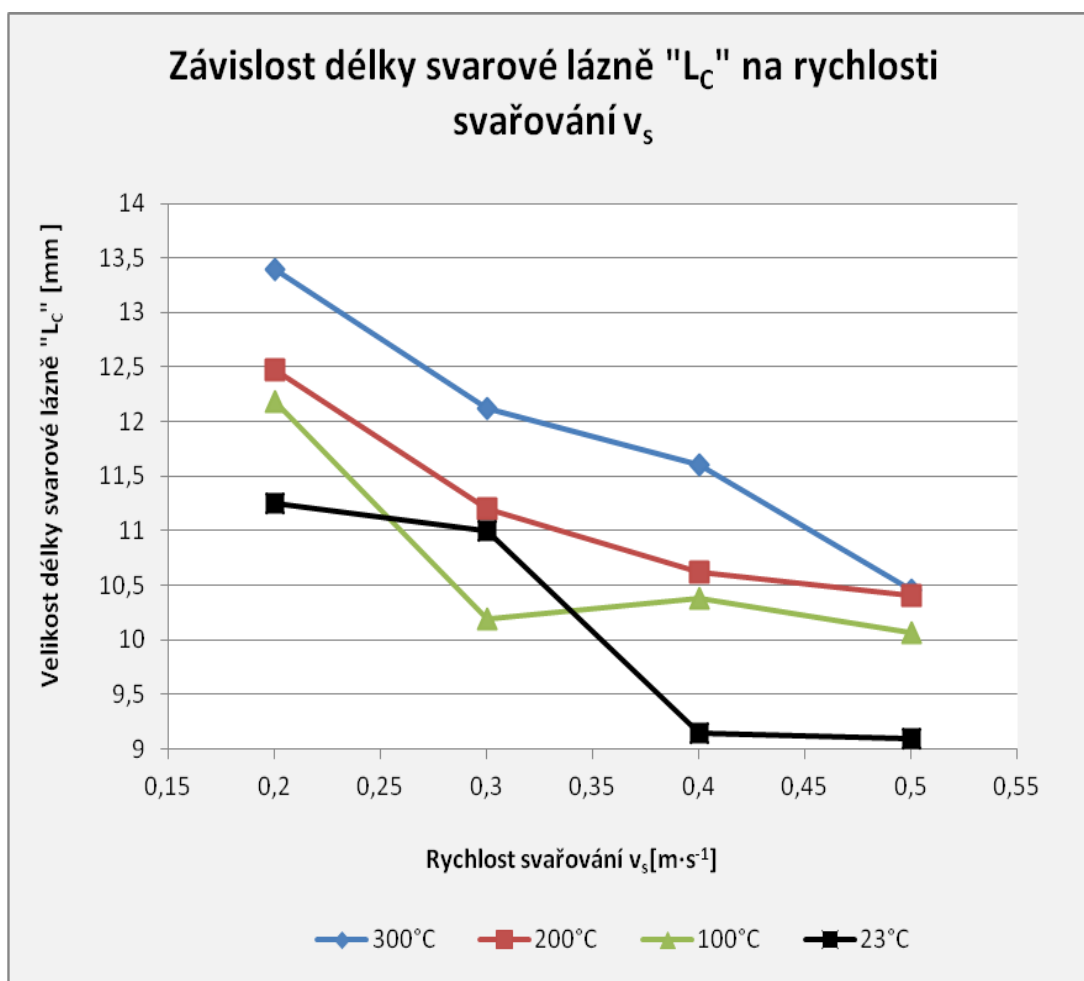
Tab.3.10: Analyzované geometrické rozměry svaru S5c239

Zkratová oblast - T300S5c239							
$I_{\text{nastavené}}$ [A]	$v_{\text{nastavená}}$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Teplota [°C]	a [mm]	b [mm]	$b_{\text{max}}$ [mm]	c [mm]	e [mm]
140	0,2	300	3,7122	5,2399	6,4976	5,2721	0,01
p [mm]	w [mm]	z [mm]	$z_{\text{max}}$ [mm]	x [mm]	$x_{\text{max}}$ [mm]	v [mm]	$v_{\text{max}}$ [mm]
1,0793	7,4339	0,4909	0,8866	0,6889	0,6889	4,2031	4,5988
$\alpha$ [°]	$\beta_1$ [°]	$\beta_2$ [°]	$P_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$P_\Delta$ [mm <sup>2</sup> ]	$P_n + P_\Delta$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_c$ [mm]	
45,24	120,31	122,86	22,586	13,7786	17,855	13,39	

Ostatní vzorky byly vyhodnocovány stejným způsobem jako vzorek S5c239. Více o geometrickém vyhodnocování je v předešlé kapitole 3.3.1.

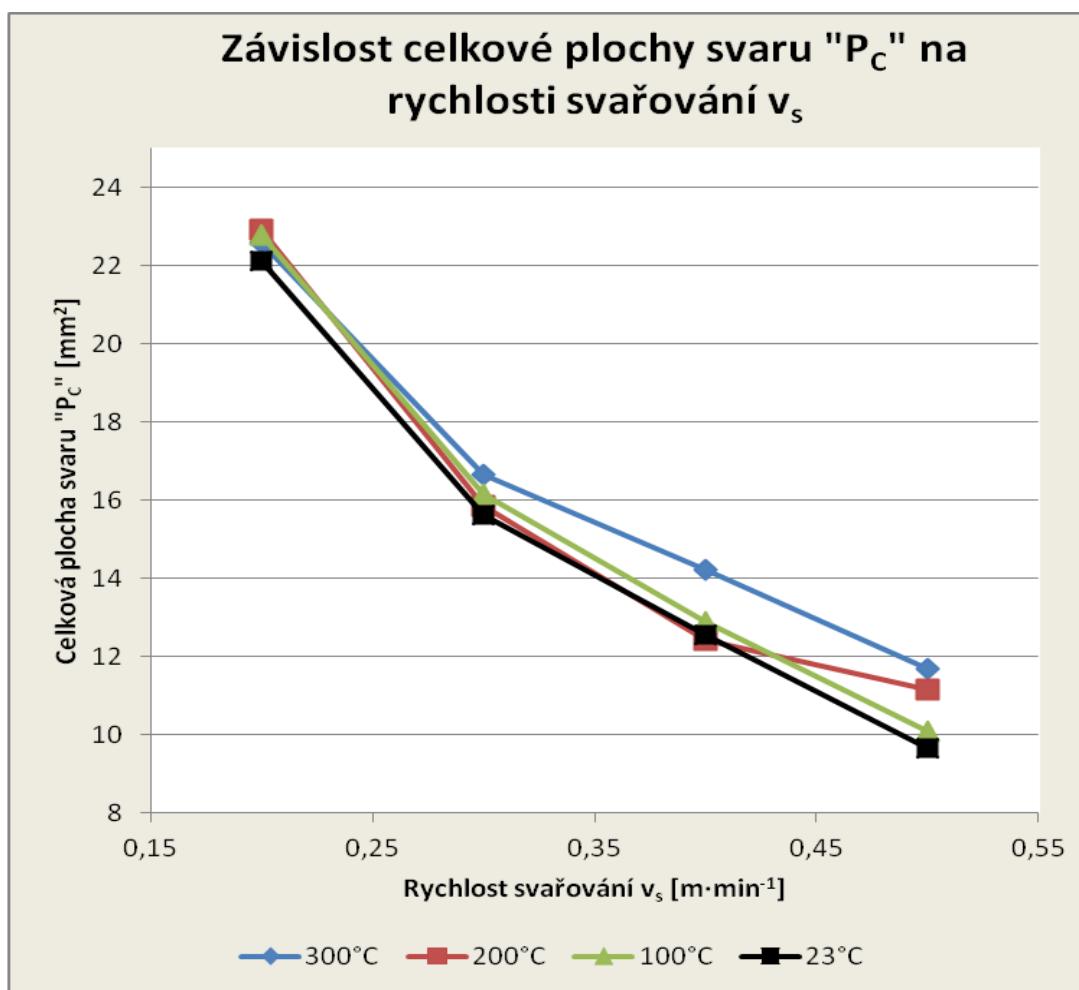
### 3. 4. Vyhodnocení experimentu

Během rozměrové analýzy bylo u každého svaru vyhodnoceno pomocí programu NIS-Elements celkově 20 geometrických údajů (více v kap. 3.3.1. a tab. 3.7. a 3.8.). Při následném vyhodnocování experimentu bude použito 5 vybraných geometrických rozměrů, které jsou více či méně důležité, například při dimenzování a návrhu svarových konstrukcí nebo při simulaci svařování. Tyto hlavní údaje byly zpracovány do grafů a následně popsány. Jedná se o celkovou délku svarové lázně " $L_c$ " (graf 3.1.), velikost celkové plochy svaru " $P_c$ " (graf 3.2.), maximální hloubka protavení " $v_{\text{max}}$ " (graf 3.3.), velikost koutového svaru " $a$ " (graf 3.4.), šířka svarové lázně " $w$ " (graf 3.5.). Vyhodnocení ostatních geometrických parametrů (" $p$ ", " $b$ ", " $b_{\text{max}}$ ", " $c$ ", " $z$ ", " $x_{\text{max}}$ ", plocha " $P_\Delta$ " a úhly " $\beta_1$ " a " $\beta_2$ ") je uvedeno v přílohách.



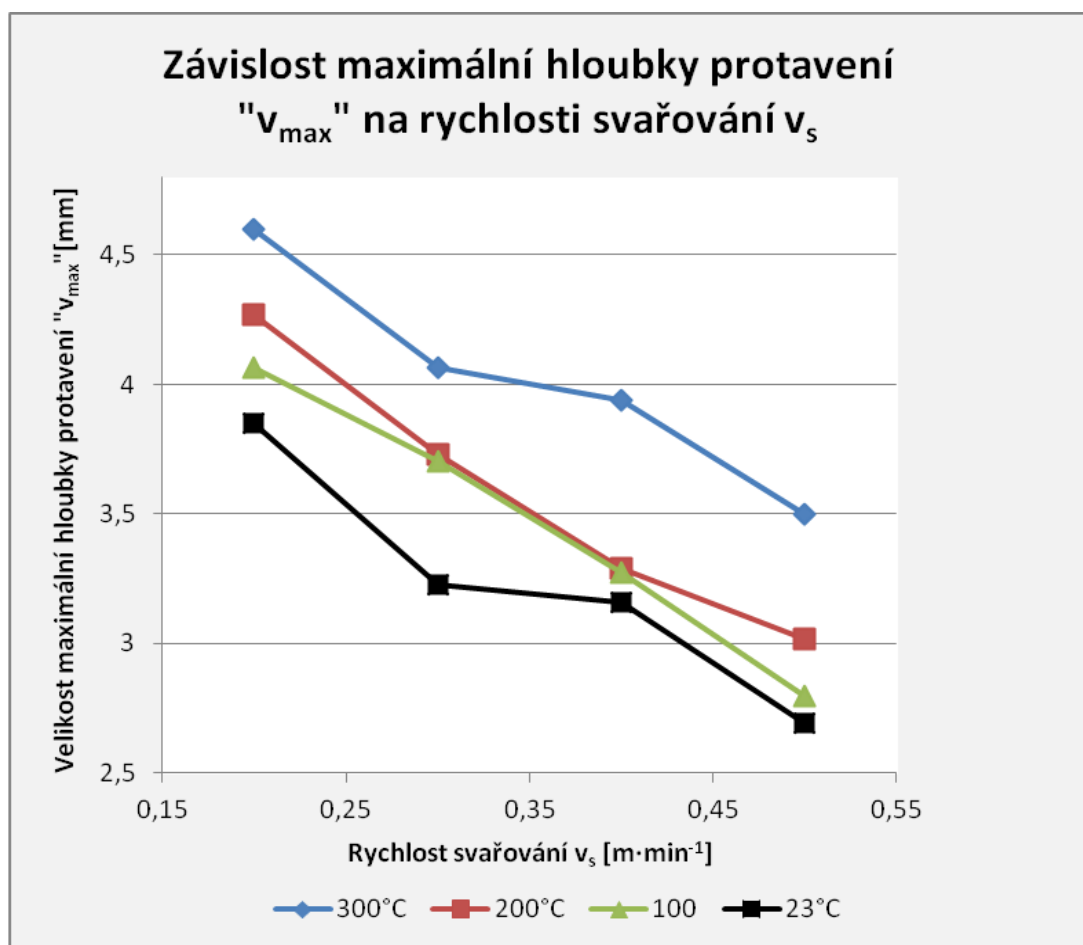
*Graf 3.1: Závislost velikosti délky svarové lázně " $L_c$ " na rychlosti svařování  $v_s$*

Z grafu 3.1. je evidentní, že čím vyšší je teplota předehřevu, tím větší je délka svarové lázně a to v celém rozsahu svařovacích rychlostí. Rozdíl v délce svarové lázně svařované s předehřevem 300°C a bez předehřevu 23°C činí až 25%. Průběh jednotlivých křivek grafu je v celém rozsahu svařovacích rychlostí až na lehké odchylky velice obdobný.



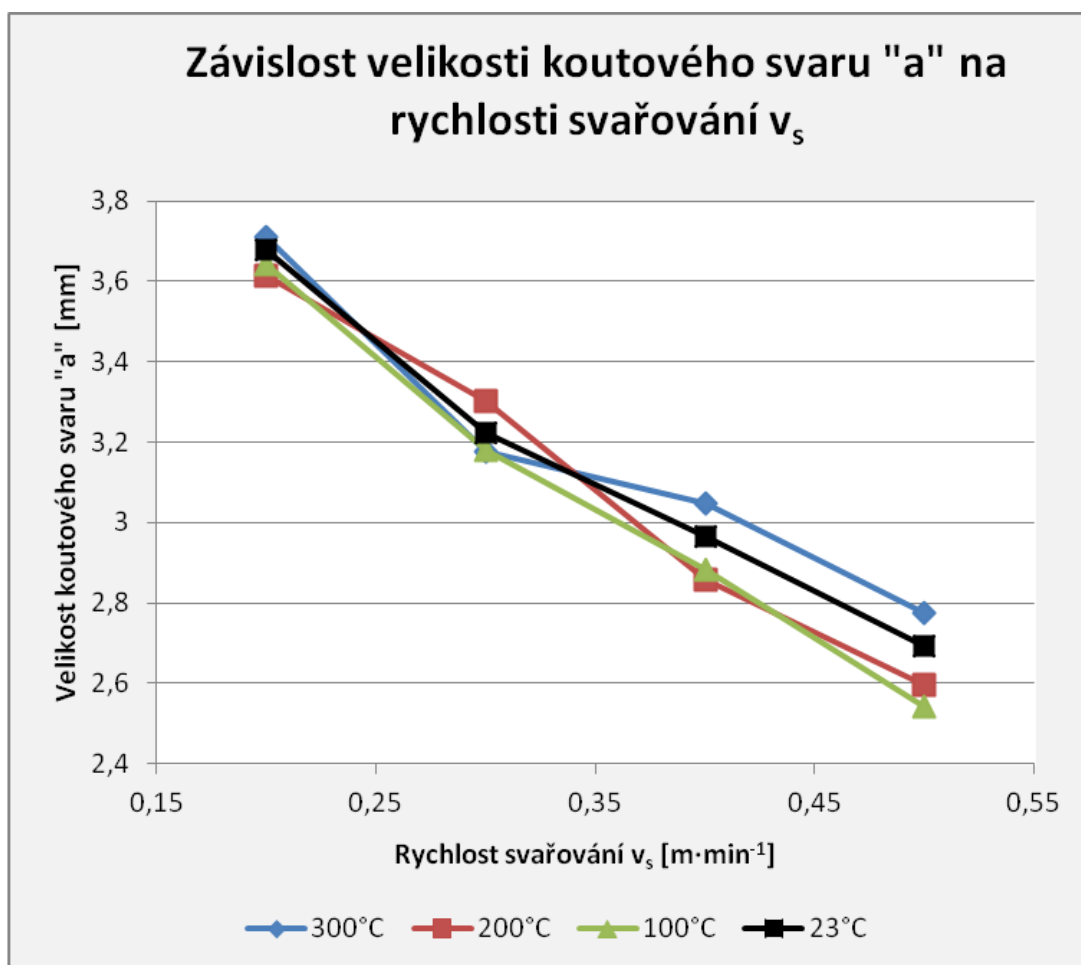
Graf 3.2: Závislost velikosti plochy svaru " $P_C$ " na rychlosti svařování  $v_s$

Z grafu 3.2. je patrné, že velikost předehřevu má na celkovou plochu svaru částečný vliv a to pouze při vyšších svařovacích rychlostech. Je to způsobeno tím, že při nízkých svařovacích rychlostech je do základního materiálu vneseno mnohem více tepla, než při vyšších rychlostech. Důsledkem toho je fakt, že předehřev nemá vliv na velikost celkové plochy svaru při nízkých rychlostech svařování. Průběh jednotlivých křivek grafu je v celém rozsahu svařovacích rychlostí podobný.



Graf 3.3: Závislost velikosti maximální hloubky protavení " $v_{\max}$ " na rychlosti svařování  $v_s$

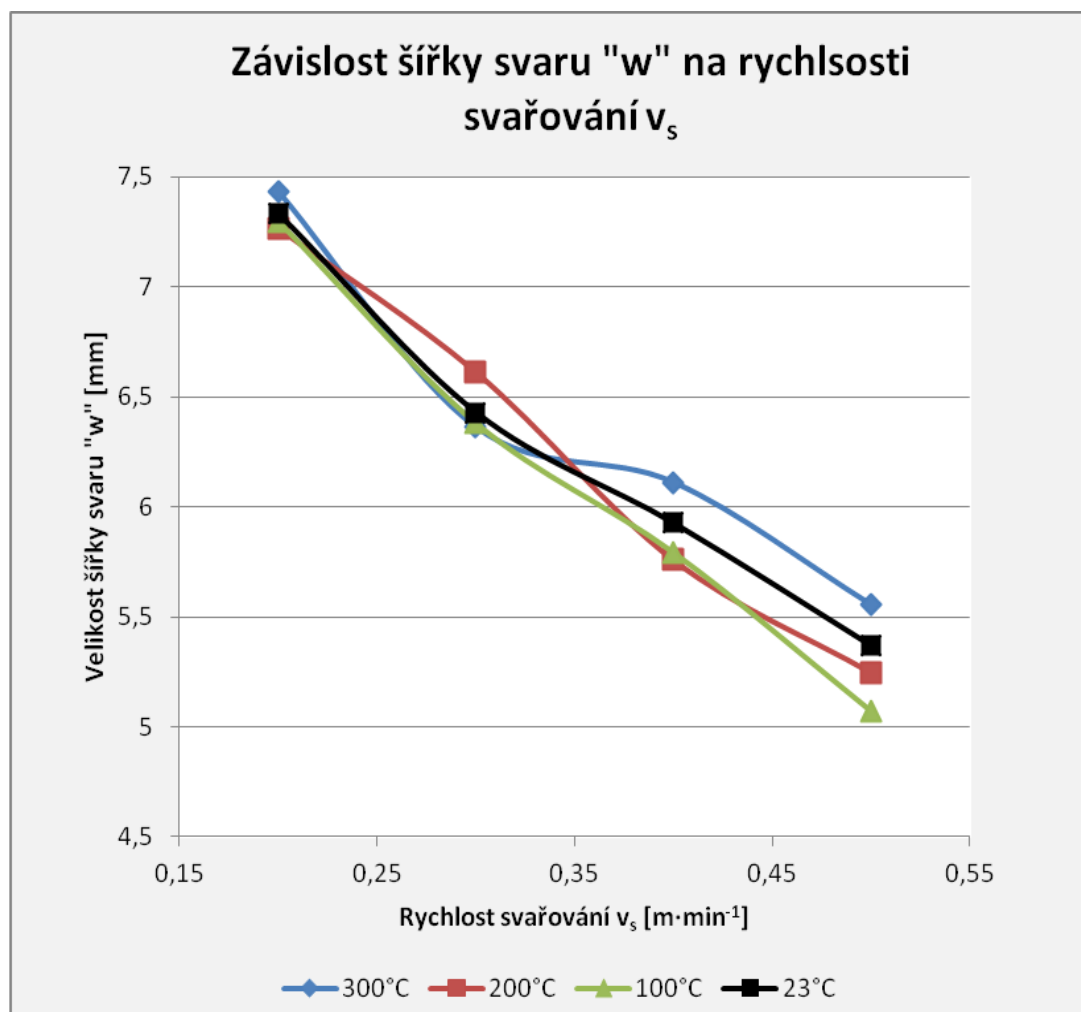
Z grafu 3.3. je jasně zřetelné, že předehřev má prokazatelný vliv na maximální hloubku protavení. Čím je teplota předehřevu větší, tím se zvětšuje i maximální hloubka protavení. Zřetelný vliv má teplota předehřevu jak při nízkých, tak i vysokých rychlostech svařování. Rozdíl v maximální hloubce protavení je u svarů s teplotou předehřevu 300°C a bez předehřevu až 25%. Jednotlivé křivky mají i zde velice podobné průběhy v celém rozsahu svařovacích rychlostí.



Graf 3.4: Závislost velikosti koutového svaru "a" na rychlosti svařování  $v_s$

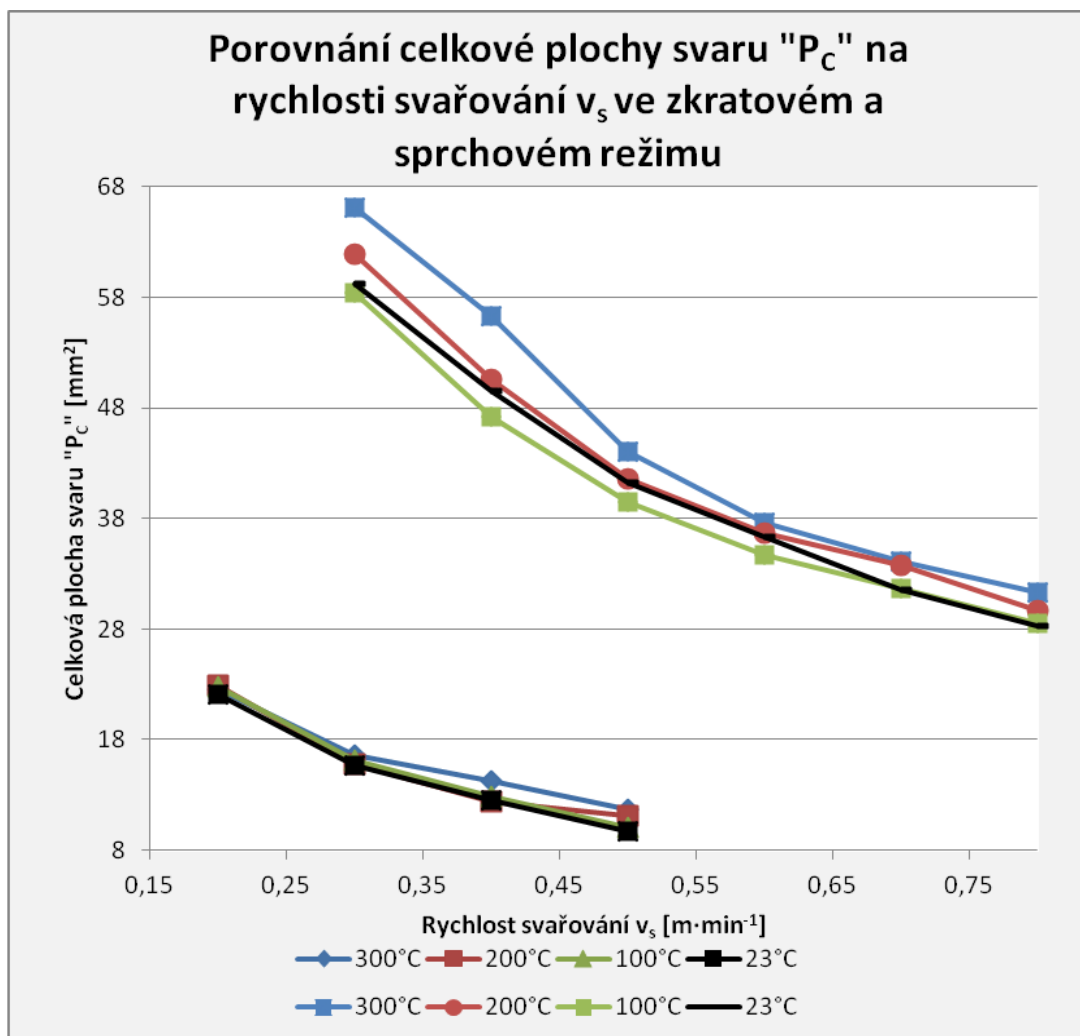
Pomocí grafu 3.4. je možno konstatovat, že předehřev nemá vliv na velikost koutového svaru. Je to způsobeno jen minimálními rozdíly ve velikostech parametru "a". Jednotlivé křivky mají opět velice podobné průběhy v celém rozsahu svařovacích rychlostí.





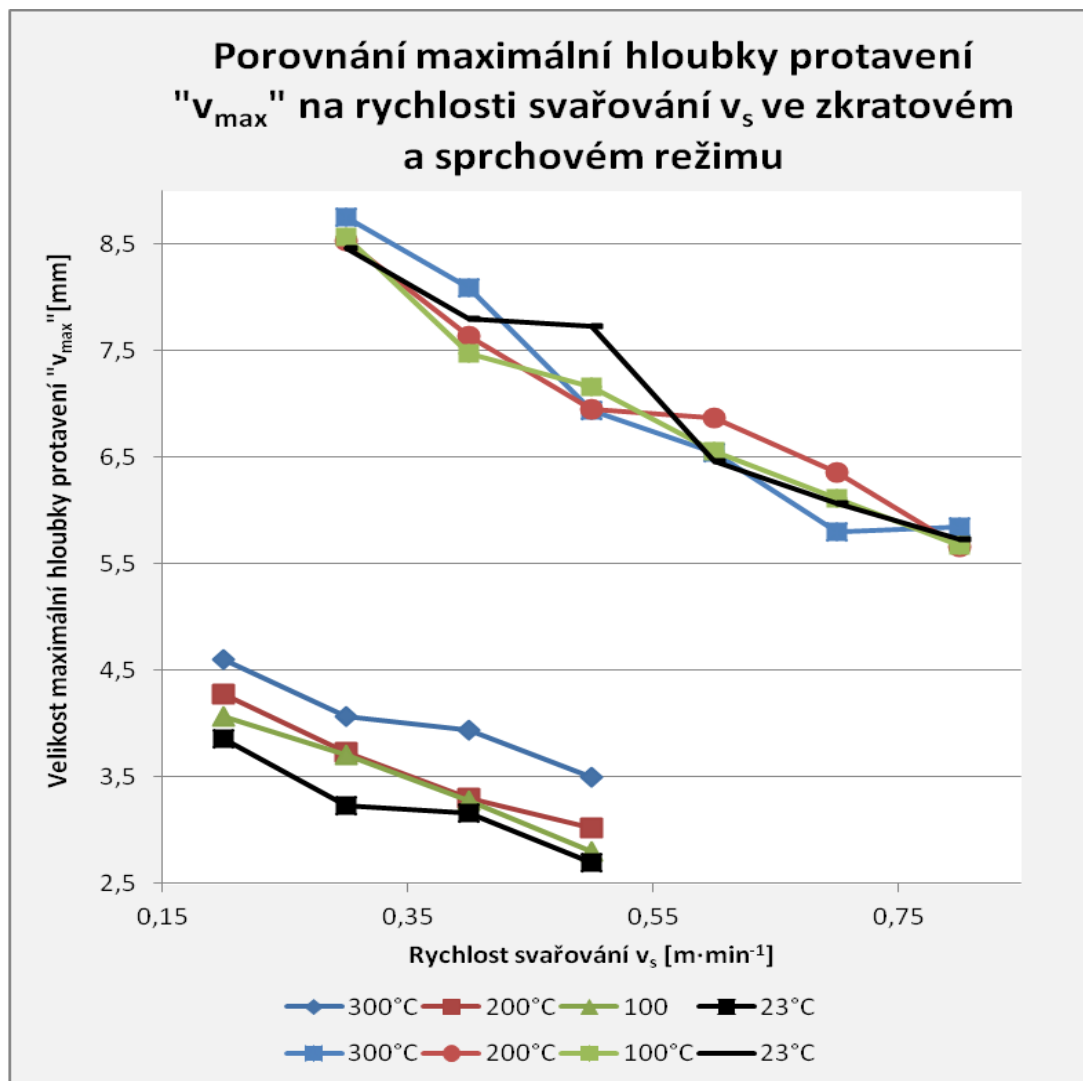
*Graf 3.5: Závislost šířky svaru "w" na rychlosti svařování  $v_s$*

Z grafu 3.5. je evidentní, že předehřev neovlivňuje velikost koutového svaru "a", ale také i šířku svaru "w". To lze vysvětlit konstantní rychlostí podávání drátu při jednotlivých experimentech, protože obě tyto geometrické veličiny jsou u koutového svaru tvořeny právě přetaveným přídavným materiálem. Jednotlivé křivky mají velice obdobný průběh jako křivky u parametry "a" v grafu 3. 4. a to v celém rozsahu svařovacích rychlostí. Je to způsobeno faktem, že parametry "a" a "w" spolu úzce korespondují.



*Graf 3.6: Porovnání hodnot závislosti celkové plochy " $P_C$ " na rychlosti svařování  $v_s$  u svarů svařovaných ve zkratovém a sprchovém režimu.*

V grafu 3.6. jsou porovnány hodnoty celkových ploch svarů svařovaných ve zkratovém a sprchovém přenosu. Svary ve sprchovém režimu přenosu kovu v oblouku byly realizovány v rámci jiného experimentu a to se stejnými teplotami předehřevu. Z grafu je patrné, že ve sprchovém režimu má předehřev sice malý vliv na velikost celkové plochy, ale i přesto rozdíly činí až 10%. U zkratového režimu je vliv pouze částečný (viz. graf 3.2.). Jednotlivé křivky ve zkratovém a sprchovém režimu mají v celém rozsahu svařovacích rychlostí obdobné průběhy.



*Graf 3.7: Porovnání maximální hloubky protavení " $v_{max}$ " v závislosti na rychlosti svařování  $v_s$  u svarů svařovaných ve zkratovém a sprchovém režimu.*

V grafu 3.7. jsou názorně porovnány hodnoty maximálních hloubek protavení u svarů svařovaných ve zkratovém a sprchovém režimu. Ze zmíněného grafu je evidentní, že předehřev má zásadní vliv na maximální hloubku protavení pouze u vzorků svařovaných ve zkratovém režimu a to v celém rozsahu svařovacích rychlostí. U vzorků svařovaných ve sprchovém režimu není vliv předehřevu téměř patrný. Příčinou této skutečnosti je velké množství vneseného tepla, které je vneseno do svařovaného materiálu v bezzkratovém režimu. Jednotlivé křivky ve zkratovém a sprchovém režimu mají obdobné průběhy a to v celém rozsahu svařovacích rychlostí.

## 4. Závěr

Svařování není jen způsob spojování součástí v nerozebíratelné spoje, nýbrž na něj musíme pohlížet jako na operaci s velkým množstvím proměnných vstupujících do samotného průběhu svařování. Dále je v něm obsaženo velké množství znalostí z matematiky, fyziky, chemie a metalurgie, a tudíž je nutná dostatečná kvalifikace technologů i svářečů. Důsledkem toho je, že se svařování řadí mezi zvláštní a poměrně náročné procesy. Zároveň je však z praktického hlediska velmi zajímavé strojírenské odvětví.

Geometrie svarové lázně je ovlivněna metalurgickými ději, dále rozdílnými vstupními parametry svařování, které jsou navzájem propojeny, a vzájemně se ovlivňují. Je proto velmi těžké s jistotou predikovat samotnou geometrii. Za stávajících podmínek, na základě již dříve nabraných zkušeností, je to jen z části možné. Skutečný tvar svarové lázně není možno hodnotit jen vizuálně, nýbrž nutnou podmínkou je i laboratorní analýza a měření. Aby bylo možné již dopředu simulovat geometrii svarové lázně, by bylo zapotřebí velkého množství experimentů, na základě kterých by se za různých vstupních podmínek a parametrů shromáždilo velké množství dat potřebných k přesné predikci. Tato skutečnost je bohužel velmi časově a finančně náročná.

Cílem této bakalářské práce bylo na základě experimentů zjistit a popsat vliv teploty předehřevu na geometrii koutového svaru z materiálu 11 373, tloušťky 5 mm svařovaných metodou MAG. Vždy se jedná o kombinaci základního materiálu (11373), přídavného materiálu (OK Autrod 12.51o průměru 1,2 mm) a ochranného plynu (Euromix M21). Byla tedy zvolena kombinace velice často využívaná výrobcí ocelových konstrukcí. V průběhu plnění experimentu bylo na vzorcích realizováno celkem 16 svarů dle plánu experimentu (tab. 3.1.) ve zkratovém režimu za třech různých teplot předehřevu a teploty okolí. U všech svarů byly systémem WeldMonitor monitorovány svařovací parametry (tab. 3.5. a 3.6.). U všech vzorků byly dále analyzovány veškeré geometrické rozměry (tab. 3.7. a 3.8.) a následně graficky zpracované (viz. kap. 3.4.) za účelem analýzy vlivu různých teplot předehřevu. Celkově bylo analyzováno u každého svaru 20 geometrických údajů, z nichž nejdůležitější (velikost koutového svaru "**a**", délka svarové lázně "**L<sub>C</sub>**", maximální hloubka protavení "**v<sub>max</sub>**", šířka svarové lázně "**w**", celková plocha svarové lázně "**P<sub>C</sub>**") byly graficky vyhodnoceny a popsány. Vyhodnocení ostatních geometrických veličin je uvedeno v příloze. Navíc bylo v této práci (pro dvě vybrané veličiny) ukázáno, jak je vliv předehřevu rozdílný v závislosti na výkonu zdroje (zkratový a bezzkratový proces). Nutno dodat, že vliv předehřevu byl pro různé geometrické veličiny různý. Například na hloubce protavení "**v<sub>max</sub>**" nebo u celkové délky svarové lázně "**L<sub>C</sub>**" se projevil více jak 20% nárůstem. Vliv předehřevu zaznamenalo i převýšení svarové lázně "**p**" a částečně také celková plocha svaru "**P<sub>C</sub>**" (při vyšších svařovacích rychlostech). U dalších parametrů jako je šířka svarové lázně

"w", nebo velikost koutového svaru "a" nebyl rozdíl téměř žádný. Lze to vysvětlit konstantní rychlostí podávání drátu při jednotlivých experimentech, protože obě tyto geometrické veličiny jsou u koutového svaru tvořeny právě přetaveným přídavným materiálem.

Získané hodnoty nelze považovat za obecnou znalost pro svařování metodou MAG. Dosažené hodnoty se budou měnit podle použité kombinace základní materiál – přídavný materiál – ochranný plyn. Tato práce však ukázala jakým způsobem budou jednotlivé geometrické veličiny ovlivněny nebo jak postupovat při podobné experimentální činnosti.

## 5. Seznam použité literatury

- [1] KUNCIPÁL J. a kol., *Teorie svařování*, SNTL Praha 1986
- [2] <http://automig.cz/o-svarovani/metody/vice-o-metodach-svarovani/>
- [3] Kolektiv autorů, *Technologie svařování a zařízení*, ZEROSS, Ostrava 2001
- [4] MORAVEC J., *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*, Liberec 2011
- [5] <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/07-08-131-135.pdf>
- [6] <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [7] <http://www.esab.cz/cz/cz/education/processes-mig-gmaw.cfm>
- [8] [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/technologie\\_vyroby\\_I\\_\\_svarovani\\_\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_I__svarovani__kubicek.pdf)
- [9] [http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani\\_a\\_deleni\\_materialu/MAG\\_svarovani\\_nelegovane\\_ocele\\_\\_.pdf](http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani_a_deleni_materialu/MAG_svarovani_nelegovane_ocele__.pdf)
- [10] [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-86EA2816-82114942/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_997.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-86EA2816-82114942/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_997.htm)
- [11] [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cviceni11\\_prezetace.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cviceni11_prezetace.pdf)
- [12] [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cviceni10\\_prezetace.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cviceni10_prezetace.pdf)
- [13] [http://bcz.vamberk.eu/CD\\_CZ\\_5\\_2011/PDF/opravy\\_renovace.pdf](http://bcz.vamberk.eu/CD_CZ_5_2011/PDF/opravy_renovace.pdf)
- [14] <http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=predehrev>
- [15] [http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani\\_a\\_deleni\\_materialu/Svarovani\\_v\\_ochrannych\\_atmosferach.pdf](http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani_a_deleni_materialu/Svarovani_v_ochrannych_atmosferach.pdf)
- [16] <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006061401>
- [17] <http://home.spsostrov.cz/~tureda/WEB2/metody.html>
- [18] <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008020702>
- [19] KOLEKTIV AUTOROV: *Zvárací metody a zariadenia*, Ostrava 2000
- [20] <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2009050601>

- [21] <http://www.generalweld.cz/cz/standards.php?id=20>
- [22] [http://www.electric.cz/weldmonitor\\_cz.htm](http://www.electric.cz/weldmonitor_cz.htm)
- [23] [http://www.migatronik.cz/media/navigator\\_2500-3000\\_cz.pdf](http://www.migatronik.cz/media/navigator_2500-3000_cz.pdf)
- [24] <http://www.primat.cz/vsb-fs/predmety/zaklady-technologie-svarovani-q23896/predehrev-m110933/download/>
- [25] [http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv\\_teplo\\_rezimu\\_a1.pdf](http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_teplo_rezimu_a1.pdf)
- [26] SYCHRA Miroslav, *Vliv svařovacích parametrů na geometrii svarové lázně při svařování metodou MAG*, [Diplomová práce]. Liberec 2011. TU v Liberci, FS.

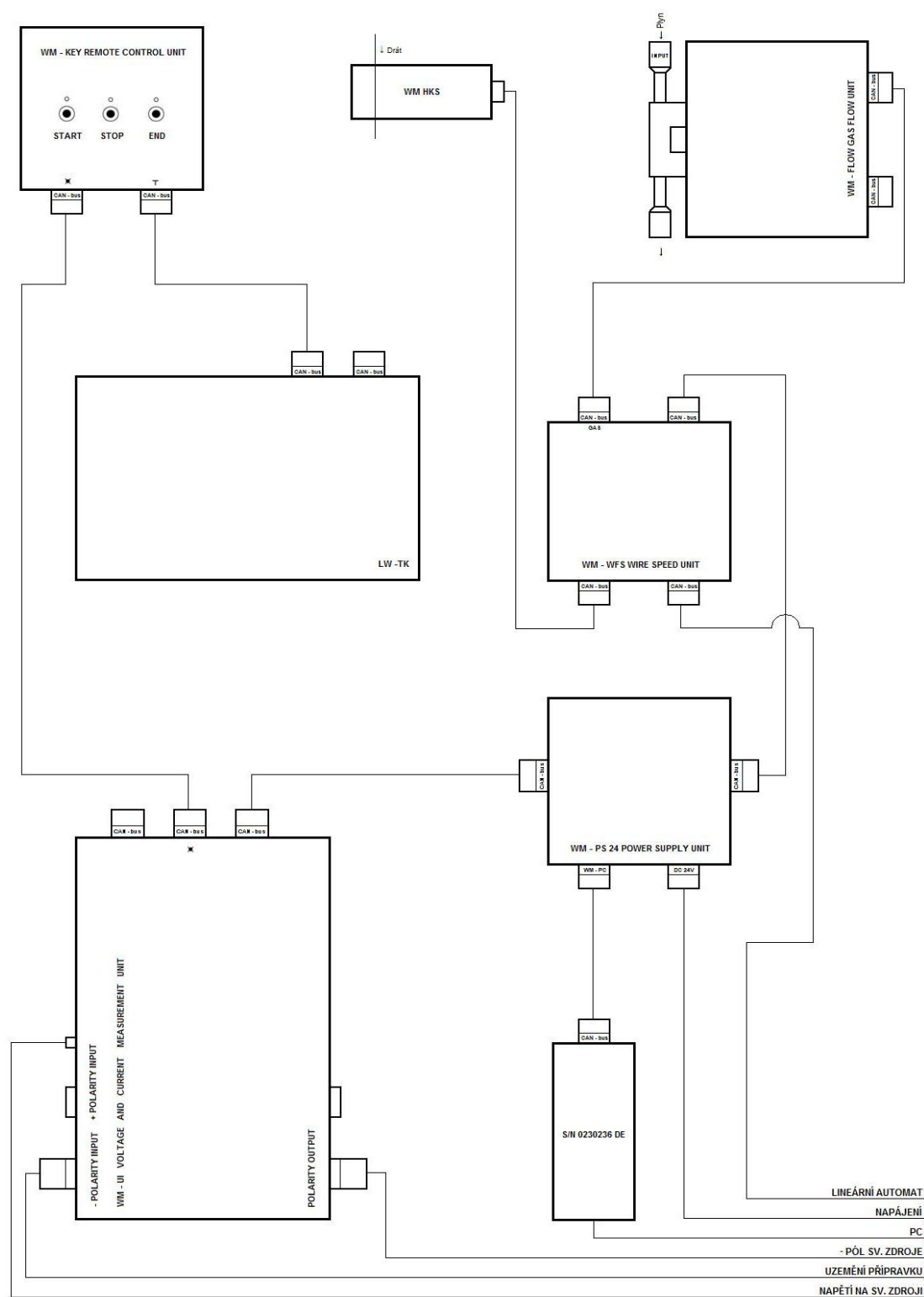
## 6. Seznam příloh

Příloha č. 1.	obr. 7.1: Schéma zapojení zařízení pro měření svařovacích parametrů Weldmonitor
Příloha č. 2.	Graf 7.1: Závislost převýšení svaru "p" na rychlosti svařování $v_s$ Graf 7.2: Závislost nosného průřezu svaru " $P_\Delta$ " na rychlosti svařování $v_s$
Příloha č. 3.	Graf 7.3: Závislost parametru "b" na rychlosti svařování $v_s$ Graf 7.4: Závislost parametru "c" na rychlosti svařování $v_s$
Příloha č. 4.	Graf 7.5: Závislost parametru " $b_{max}$ " na rychlosti svařování $v_s$ Graf 7.6: Závislost parametru " $x_{max}$ " na rychlosti svařování $v_s$
Příloha č. 5.	Graf 7.7: Závislost úhlu " $\beta_1$ " na rychlosti svařování $v_s$ Graf 7.8: Závislost úhlu " $\beta_2$ " na rychlosti svařování $v_s$
Příloha č. 6.	Graf 7.9: Závislost parametru "z" na rychlosti svařování $v_s$

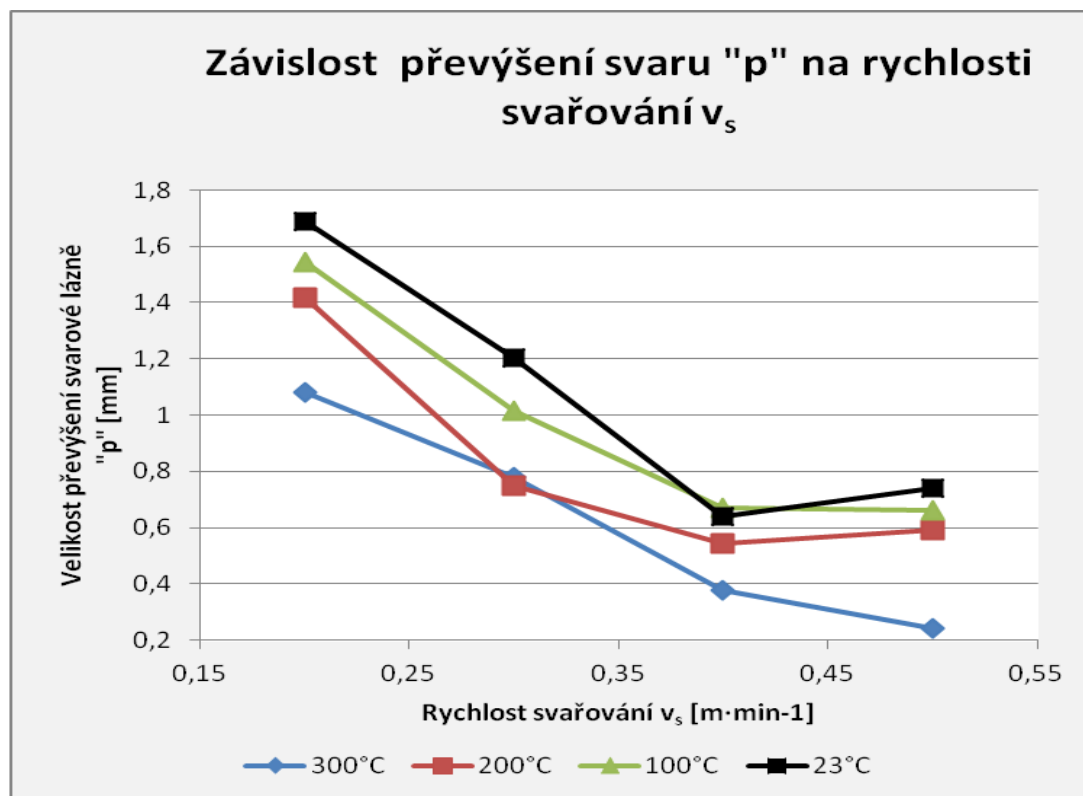


## 7. Přílohy

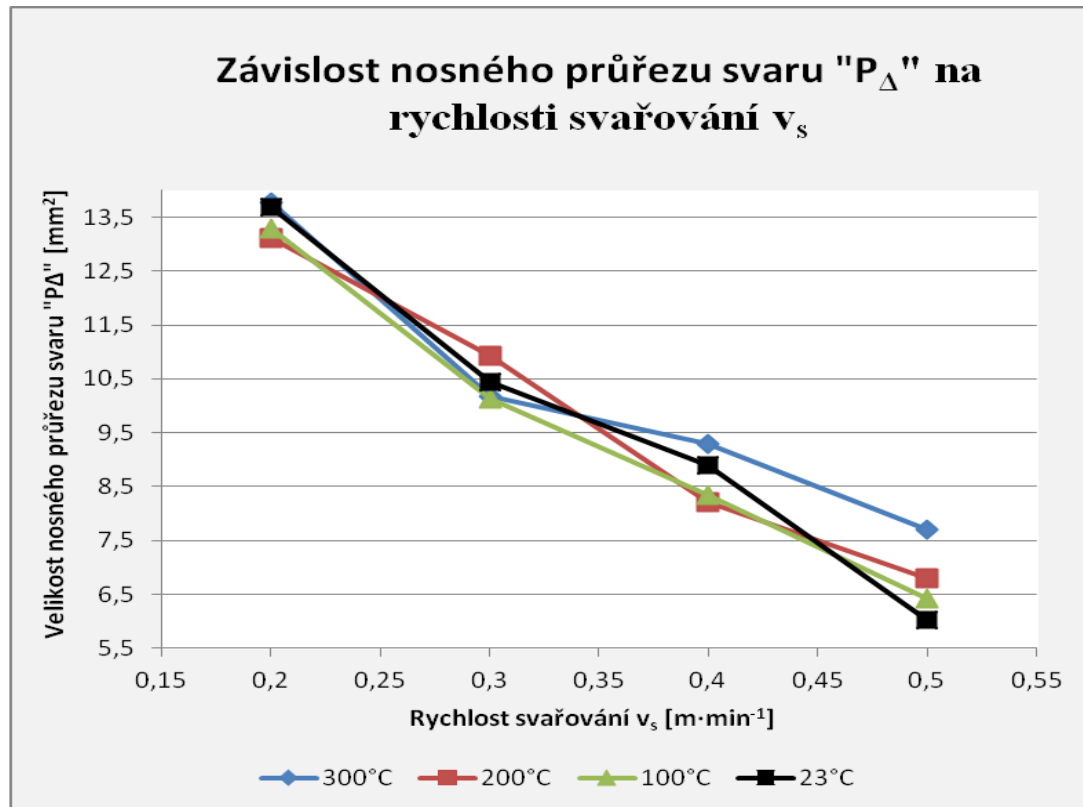
### Příloha č. 1.



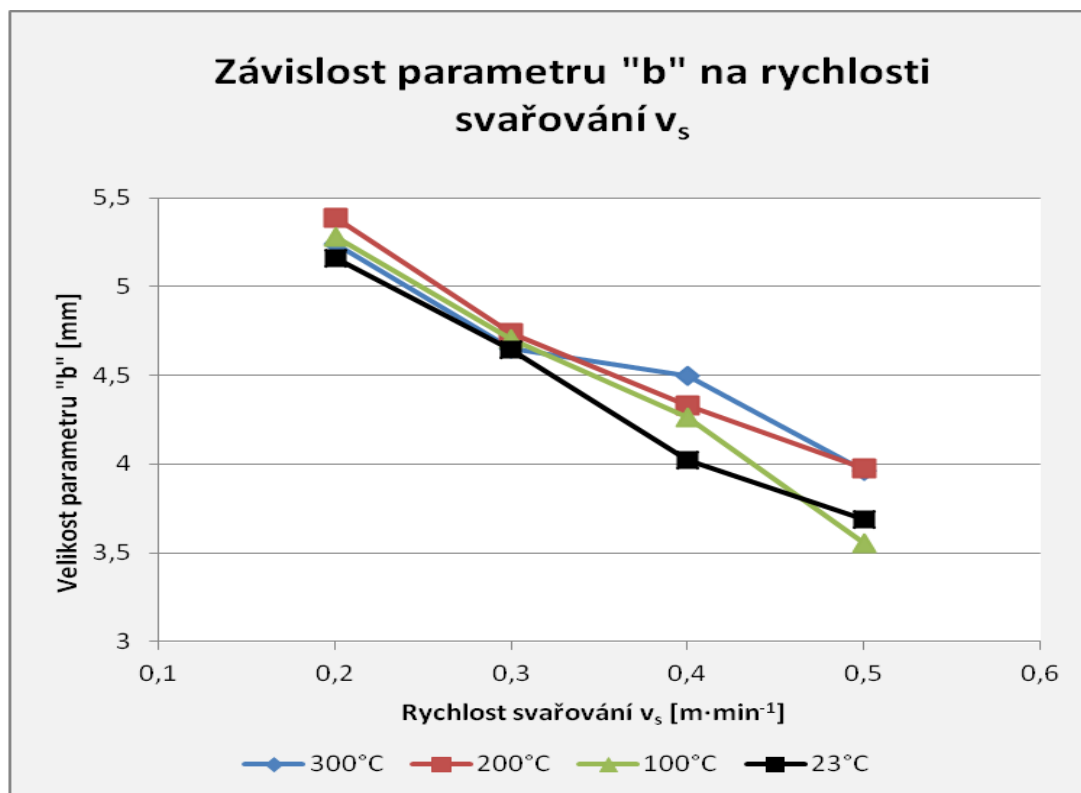
obr.7.1: Schéma zapojení zařízení pro měření svařovacích parametrů systémem WeldMonitor [26]



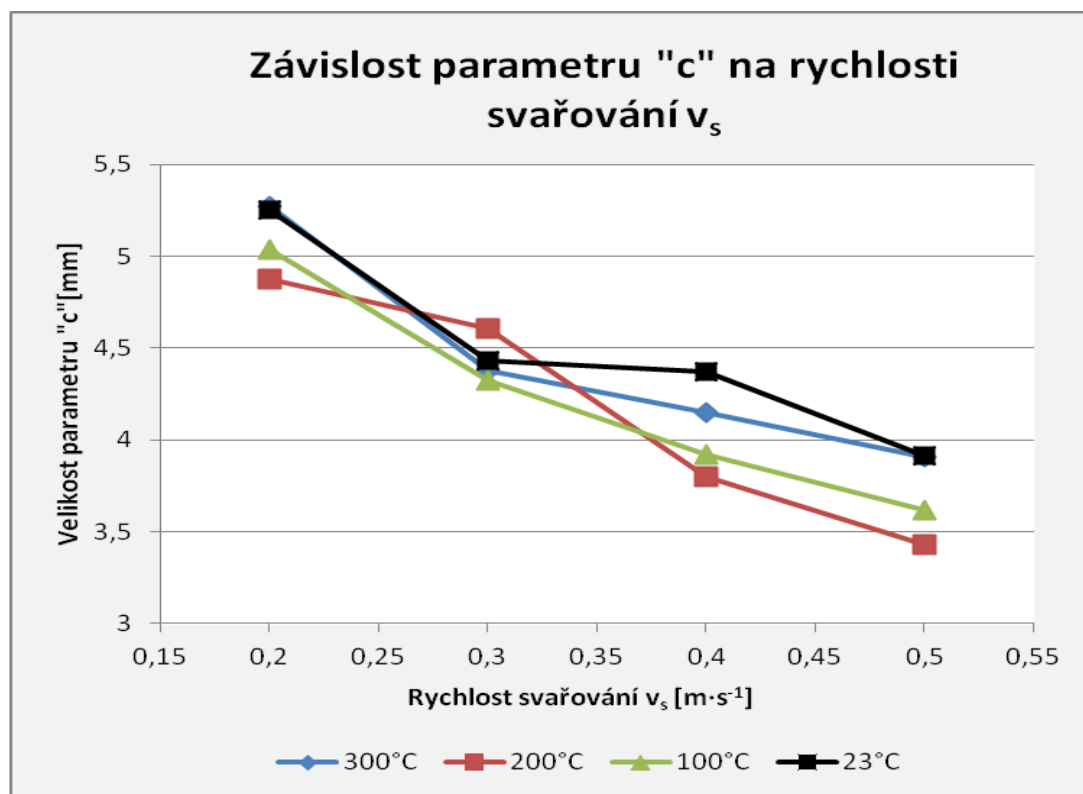
Graf 7.1: Závislost převýšení svaru "p" na rychlosti svařování  $v_s$



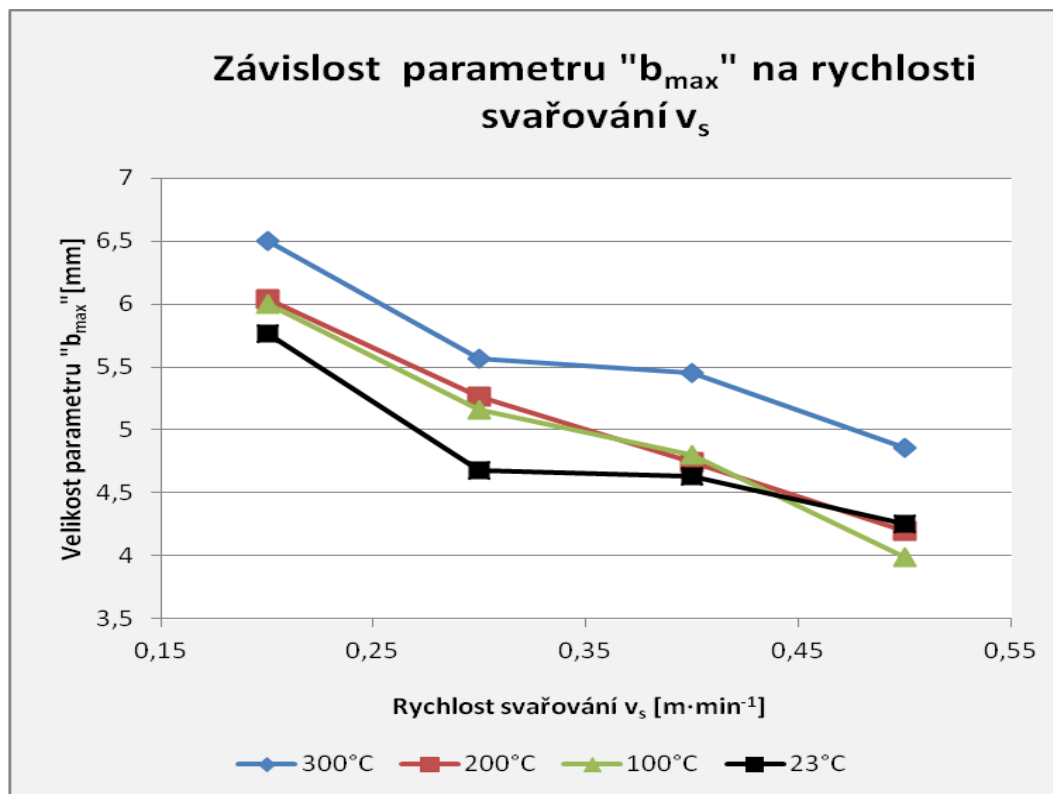
Graf 7.2: Závislost nosného průřezu svaru " $P_\Delta$ " na rychlosti svařování  $v_s$



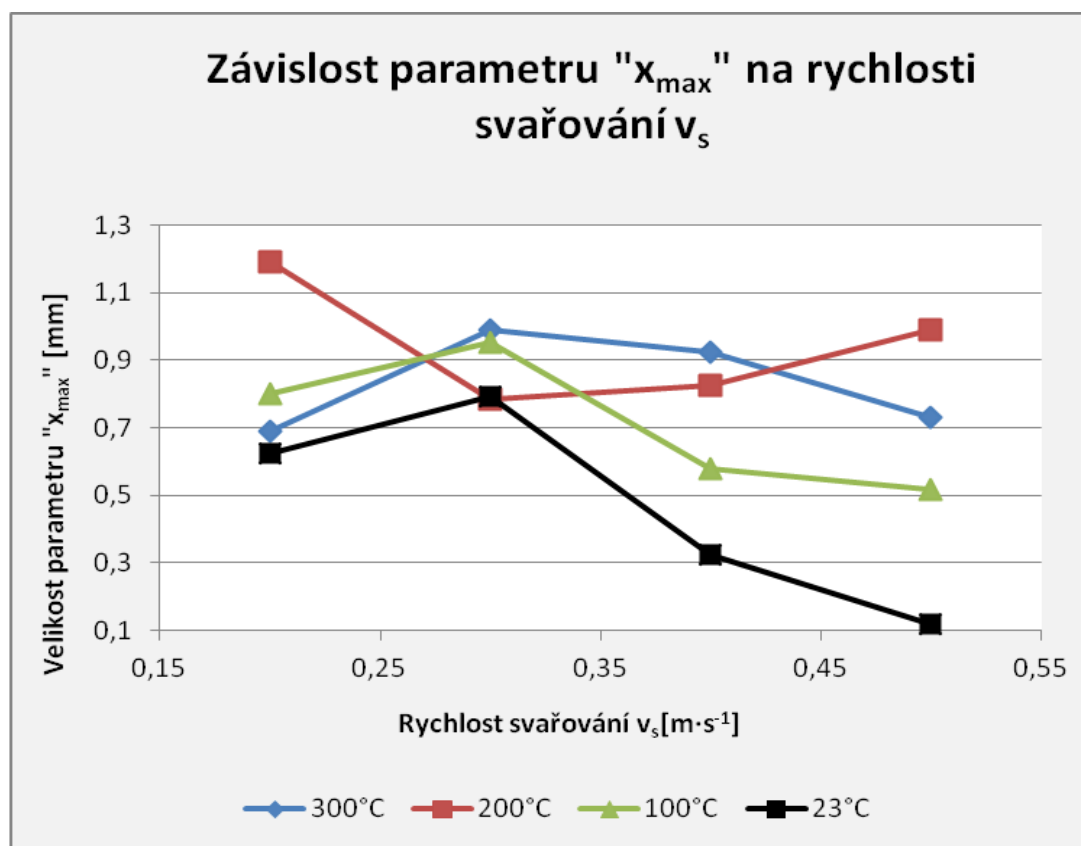
Graf 7.3: Závislost parametru "b" na rychlosti svařování  $v_s$



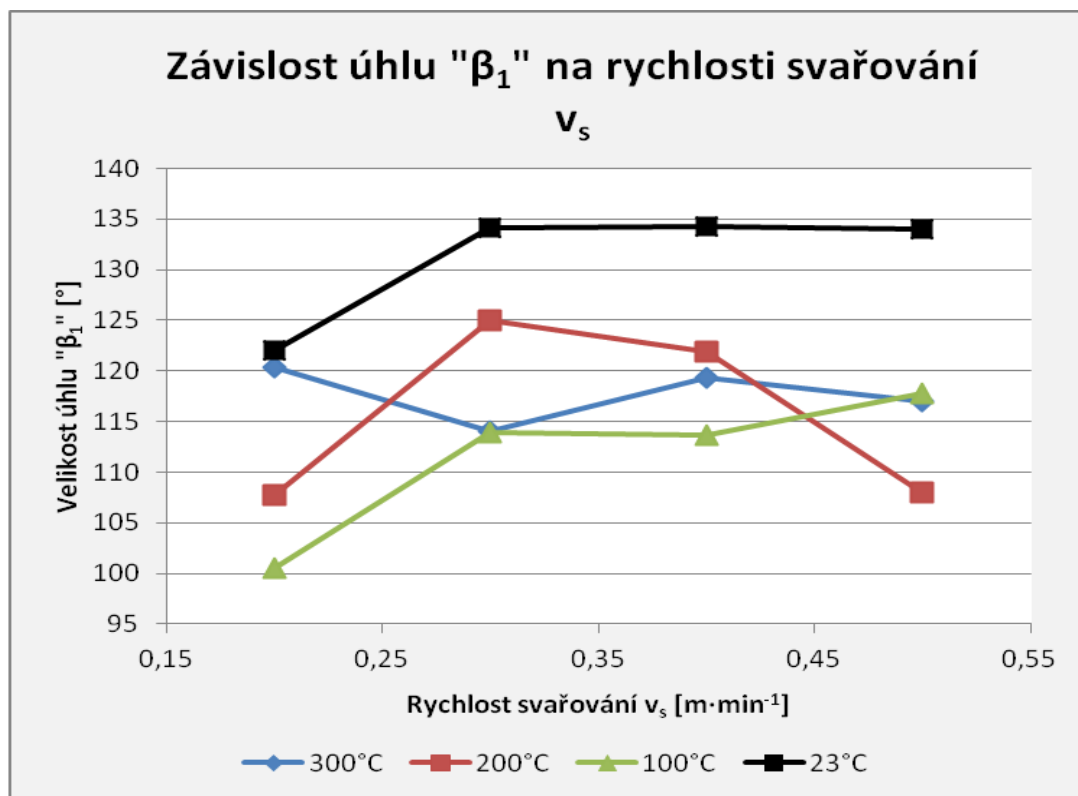
Graf 7.4: Závislost parametru "c" na rychlosti svařování  $v_s$



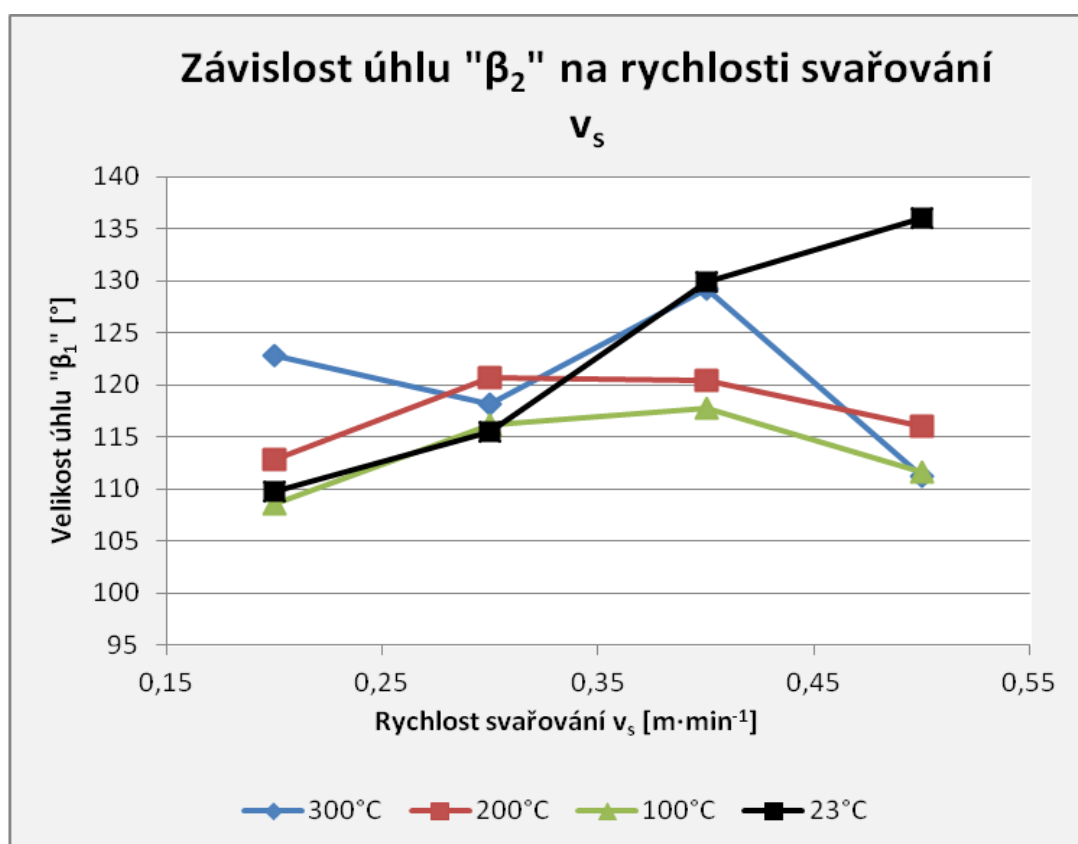
Graf 7.5: Závislost parametru " $b_{\max}$ " na rychlosti svařování  $v_s$



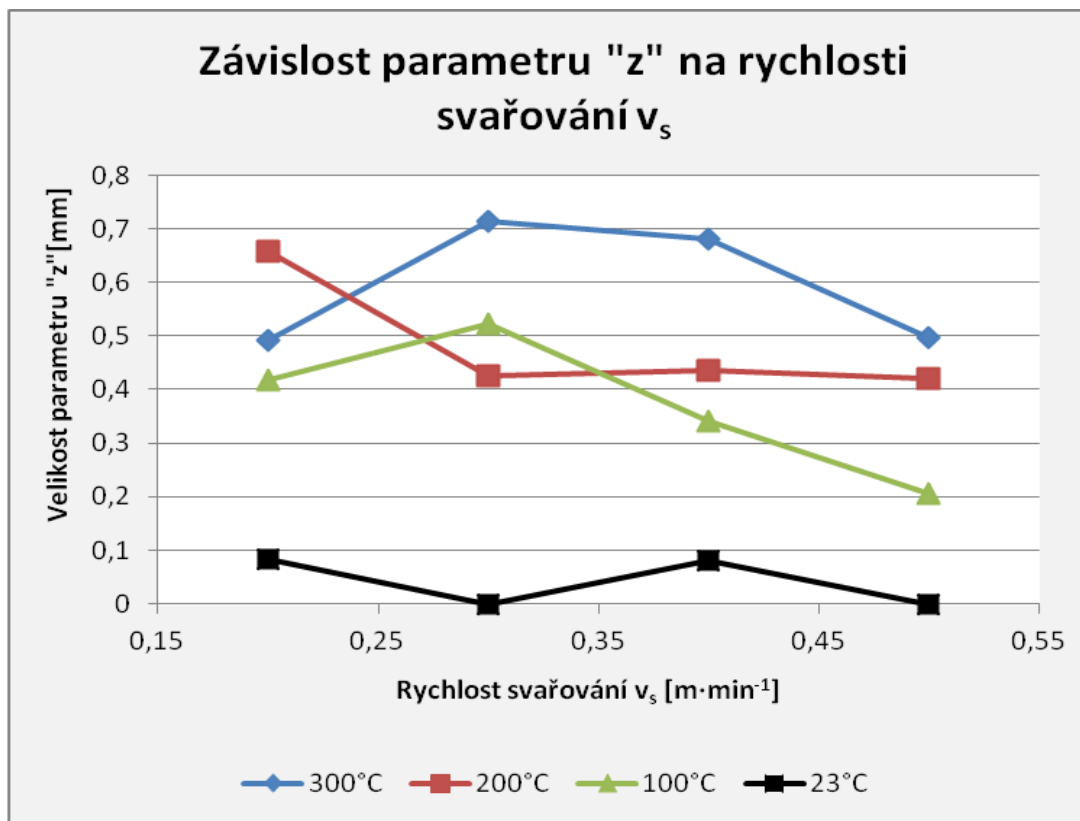
Graf 7.6: Závislost parametru " $x_{\max}$ " na rychlosti svařování  $v_s$



Graf 7.7: Závislost úhlu " $\beta_1$ " na rychlosti svařování  $v_s$



Graf 7.8: Závislost úhlu " $\beta_2$ " na rychlosti svařování  $v_s$



Graf 7.9: Závislost parametru "z" na rychlosti svařování  $v_s$

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřeby TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 4. 1. 2013

Podpis:

## Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 4. 1. 2013

Signature: